

3 Ergebnisse

3.1 Entwicklung wichtiger Bodenparameter unter erhöhtem CO₂

Im folgenden Abschnitt werden zunächst die für das CO₂-Experiment ausgewählten Ring-Flächen E1 bis A3 anhand ihrer Lagerungsdichte, der Bodenfeuchte und Bodentemperatur näher charakterisiert. Bodenfeuchte und -temperatur sind für die nachfolgend betrachteten Ergebnisse (v.a. die Erträge und Spurengasflüsse) sensible Steuergrößen. Daher müssen zunächst zwei Fragen geklärt werden: Erstens, waren die für das Experiment ausgewählten Flächen vor Beginn der Anreicherung in den genannten zentralen Parametern signifikant voneinander verschieden, und wenn ja, in welcher Weise? Und zweitens, entwickelten sich die Flächen in diesen Parametern nach Beginn der CO₂-Anreicherung im Mai 1998 auseinander oder trat keine Änderung ein? Bodenfeuchte-Messungen wurden ab März 1997 durchgeführt, daher können die Flächen vor Anreicherungsbeginn verglichen werden. Die Bodentemperatur-Messungen hingegen wurden erst im April 1998, kurz vor Anreicherungsbeginn, aufgenommen. Daher muß eine Charakterisierung der Untersuchungsflächen *vor* Versuchsbeginn im Hinblick auf diesen Parameter entfallen.

3.1.1 Lagerungsdichte der CO₂-Ringe vor Versuchsbeginn

Tabelle 3.1-A: Ergebnisse der Lagerungsdichte-Bestimmung am 8./9. April 1998 in den 6 CO₂-Ringen. Linke Spalten: Ergebnisse der T-Tests der einzelnen Ringpaare sowie der Mittelwerte (E1 bis E3, A1 bis A3: E vs. A). Rechte Spalten: Mittelwerte (Mw) mit Standardabweichung (=Stabw.) in den drei Tiefen. n-Zahlen pro Ring: 1 – 5 cm n = 9; 5 – 10 und 10 – 15 cm: n=5.

T-Test bei Ringpaar:	p-Wert, Signifikanz	E-Mw ± St.abw. (g)	A-Mw ± Stabw. (g)
E1 vs. A1 (1-5 cm)	<0,001 ***	0,782 ±0,092	1,008 ±0,088
E1 vs. A1 (5-10 cm)	0,395 n.s.	1,302 ±0,120	1,378 ±0,129
E1 vs. A1 (10-15 cm)	0,200 n.s.	1,405 ±0,110	1,522 ±0,112

E2 vs. A2 (1-5 cm)	0,076 n.s.	0,792 ±0,078	0,664 ±0,170
E2 vs. A2 (5-10 cm)	0,174 n.s.	1,090 ±0,025	1,005 ±0,124
E2 vs. A2 (10-15 cm)	0,037 *	1,228 ±0,124	1,064 ±0,079

E3 vs. A3 (1-5 cm)	0,979 n.s.	0,630 ±0,165	0,628 ±0,143
E3 vs. A3 (5-10 cm)	0,634 n.s.	1,013 ±0,186	0,967 ±0,093
E3 vs. A3 (10-15 cm)	0,940 n.s.	1,112 ±0,208	1,104 ±0,088

E- vs. A-Mittelwerte (1-5 cm)	0,636 n.s.	0,746 ±0,127	0,771 ±0,220
E- vs. A-Mittelwerte (5-10 cm)	0,610 n.s.	1,135 ±0,174	1,098 ±0,212
E- vs. A-Mittelwerte (10-15 cm)	0,408 n.s.	1,248 ±0,189	1,185 ±0,210

Wie Tabelle 3.1-A zeigt, gab es zwischen den Ringpaaren keinen wesentlichen Unterschied in der Lagerungsdichte. Der größte Unterschied bestand zwischen der Lagerungsdichte der obersten Horizonte (1 bis 5 cm) des E1- und des A1-Rings: Die des A1 war hochsignifikant größer als die des E1 (Tab. 3.1-A). Aber schon in den beiden Tiefen darunter war der Unterschied nicht mehr signifikant, wenn auch die A1-Lagerungsdichten immer geringfügig größer waren. Im zweiten Ringpaar dagegen war die Lagerungsdichte des E2 in allen Tiefen geringfügig höher als die des A2, wobei der Unterschied in 10 – 15 cm Tiefe signifikant war. In Ringpaar 3 war die Lagerungsdichte in allen drei Tiefen nahezu identisch. Über alle Ringpaare (E gegenüber A) gemittelt, bestanden zwischen den CO₂-Anreicherungs- und den -Kontrollringen keine signifikanten Unterschiede, die Werte waren nahezu identisch. So betrug die Lagerungsdichte über 0 bis 15 cm gemittelt für E 1,039 g cm⁻³ und für A 1,038 g cm⁻³.

3.1.2 Die Entwicklung der Bodenfeuchte in den CO₂-Ring

Die folgenden Graphiken zeigen die mit je 4 TDR-Sensoren pro CO₂-Ring und Meßtag gemessene Bodenfeuchte in Vol.-%. Generell existiert bei TDR-Messungen bei hoher Bodenfeuchte das Problem, daß die Ungenauigkeit mit steigender Bodenfeuchte ansteigt (Fa. IMKO, Produktbeschreibung der TDR-Sonden). Dazu kommen in tonhaltigen Böden wie dem Lindener Gründland die Quellungsbewegungen, die der Boden v.a. bei sehr hohen Wassergehalten ausführt. Diese verursachen durch Auseinanderweichen der Bodenpartikel eine Abnahme der Lagerungsdichte. Während der Messungen in Perioden mit hoher Bodenfeuchte traten Werte auf (vgl. Abb. 3.1-C, **a** bis **h**), die sogar über dem rechnerisch möglichen Bodenporenvolumen lagen (vgl. Tab. 3.1-B). Daher ist davon auszugehen, daß bei steigenden hohen Wassergehalten (Schätzung: ab ca. 50 Vol.-%) der "wahre" Wassergehalt durch die Quellungsbewegung des Bodens und die steigende Ungenauigkeit der TDR-Sensoren zunehmend überschätzt wurde. Im "normalen" Wertebereich während der Vegetationsperiode hingegen sind die TDR-Sonden-Messungen als sehr zuverlässig einzuschätzen, wie der unter 2.6.2 geschilderte Test zeigte.

Generell war die volumetrische Bodenfeuchte (im Folgenden nur noch mit Bodenfeuchte bezeichnet) im Ring A1 stets signifikant niedriger als die aller anderen Ringe (Abb. 3.1-A). Ringpaar 2 war das feuchteste Ringpaar, wobei in den Jahren 1997, 1998 und 2000 der Ring A2 (geringfügig, nie signifikant) feuchter war als sein Partner E2.

E3 und A3 waren einander ebenfalls sehr ähnlich; nur im Jahr 1998 (niederschlagsreicher Herbst) gab es einen signifikanten Unterschied zwischen E3 und dem feuchteren A3 (Abb. 3.1-A). Aufgrund der oben geschilderten möglichen Überschätzung der Bodenfeuchte bei sehr hohen Werten könnte ein Teil des signifikanten Unterschieds hierauf zurückzuführen sein: Wie Abb. 3.1-B (**h**) zeigt, unterschieden sich E3 und A3 erst mit den starken Herbstniederschlägen stark voneinander. Insgesamt gesehen bestand bei Ringpaar 3 weder vor ("Pre-CO₂") noch nach Beginn der CO₂-Anreicherung ("Post-CO₂") ein signifikanter Unterschied. Ring E1 ist in seiner Feuchte dem Ringpaar 3 sehr ähnlich und bis auf 1998 nie signifikant von E3 und A3 verschieden.

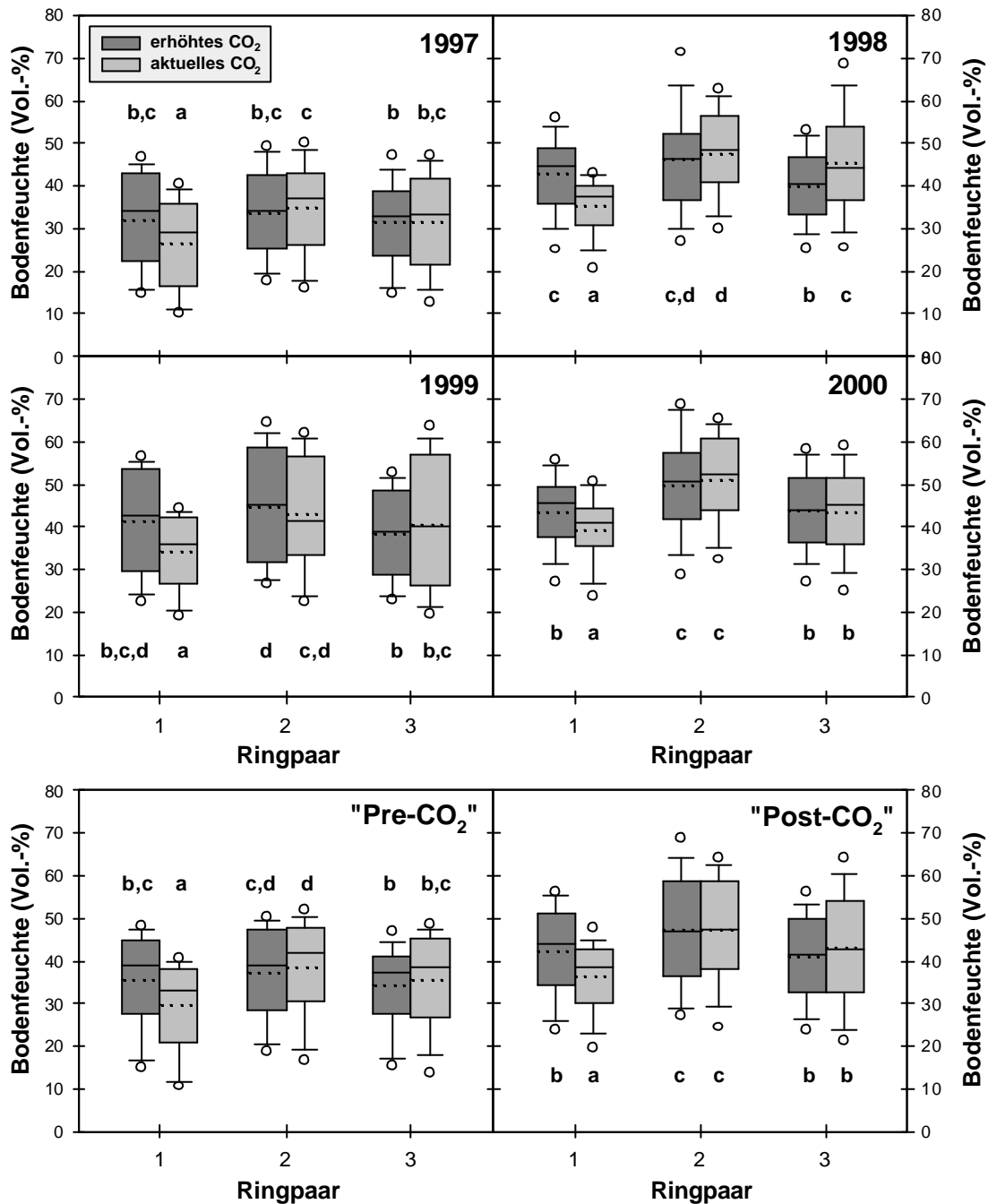


Abbildung 3.1-A: Boxplots der gemessenen Bodenfeuchtwerte in verschiedenen Zeitperioden des Hauptversuchs. Durchgezogene Linie: Medianwerte, gepunktete Linie: Mittelwerte.

Graue Boxen: 25- und 75%-Perzentile (= 50% aller Werte); vertikale Linien mit Querbalken: 10- und 90%-Perzentile, Kreise: 5- und 95%-Perzentile. (Diese Darstellungsart wird nicht erneut erklärt.)

Unterschiedliche Indizes bedeuten signifikante Unterschiede zwischen den Median-Werten der Ringe im dargestellten Zeitraum (Kruskal-Wallis-ANOVA, $p < 0,05$; nachfolgend Dunn's Test). Die Indizes wurden so gewählt, das mit **a** der trockenste Ring gekennzeichnet wurde und aufsteigend die jeweils signifikant feuchteren.

Die beste Meßgröße, um die Wasserverhältnisse der Ringflächen miteinander zu vergleichen, wäre die Wasserspannung bzw. das Wasserpotential des Bodens gewesen, da diese Größe die Porengrößenverteilung und das Porenvolumen des Bodens (als Funktionen der Korngrößenverteilung und Bodenart) beinhaltet.

Eine weitere stärker physiologisch orientierte Bodenwasser-Kenngröße ist das wasser-gefüllte Bodenporenvolumen (im Folgenden mit WFPS, *water filled pore space*, bezeichnet). Der volumetrische Wassergehalt kann anhand der Lagerungsdichte in den prozentualen Anteil des wassergefüllten Bodenporenvolumens umgerechnet werden:

$$\text{Bodenporosität} = 1 - \frac{LD}{PD} \quad \text{WFPS} = \frac{WG_{\text{Vol.-%}}}{BP}$$

mit: BP: Bodenporosität (cm³ cm⁻³)

LD: Lagerungsdichte (g cm⁻³)

PD = Partikeldichte (g cm⁻³)

WFPS (s.o.; %)

Tabelle 3.1-B: Lagerungsdichte (LD, 0 – 15 cm), Bodenporenvolumen (BVP) und Umrechnungsbeispiele von volumetrischer Bodenfeuchte in WFPS und umgekehrt für die drei Ringpaare und gemittelt über die E- und A-Ringe. Wert in Klammern: Differenz (Vol.-%) zwischen E- und A-Ring-Partner.

CO ₂ -Ring	LD g cm ⁻³	%BPV cm ³ cm ⁻³	40 Vol.-% in %WFPS	² / ₃ WFPS in Vol.-%
E1	1,163	55,4	72,1	37,0 (3,6)
A1	1,303	50,1	79,9	33,4
E2	1,037	59,3	67,4	39,6 (3,3)
A2	0,911	64,3	62,2	42,8
E3	0,918	64,0	62,5	42,7 (0,5)
A3	0,900	64,7	61,8	43,1
E (Mw)	1.039	59,6	67,1	39,5 (0,0)
A (Mw)	1.038	59,7	67,0	39,5

Da die Lagerungsdichte sich von Ring zu Ring etwas unterscheidet (vgl. Tab. 3.1-A), vor allem zwischen E1 und A1, ergibt sich bei der Umrechnung in WFPS aus derselben volumetrischen Bodenfeuchte nicht derselbe WFPS-Wert. Andersherum bedeutet ein zu ²/₃ wassergefüllter Bodenporenraum im E1-Ring eine Bodenfeuchte von 37,0 Vol.-%, beim A1-Ring dagegen nur 33,4 Vol.-%.

Die stets niedriger gemessene Bodenfeuchte im A1 ist somit weniger niedrig, wenn der Wassergehalt in der "physiologischeren" Einheit WFPS ausgedrückt wird, wie dies im Zusammenhang mit Spurengasflüssen in der Literatur häufig getan wird (vgl. GRANLI & BÖCKMANN 1994). Tabelle 3.1-B verrät weiterhin, daß in den feuchteren Ringen mit der geringeren Lagerungsdichte höhere volumetrische Bodenfeuchtwerte nötig sind, um den gleichen Anteil an wassergefülltem Porenraum zu erreichen.

Da die Lagerungsdichte wie bereits erwähnt im Jahresverlauf gewissen Schwankungen unterworfen ist (wassergehaltsabhängige Schrumpf-/Quellbewegungen, Aktivität von Wurzeln und Bodentieren), wäre die Umrechnung des volumetrischen Wassergehalts über die im April erhobenen Lagerungsdichte-Werte auf mehrere Jahre unkalkulierbar stark fehlerbehaftet. Sie wurde daher in Tab. 3.1-B nur beispielhaft umgerechnet, um die resultierenden Unterschiede zu demonstrieren.

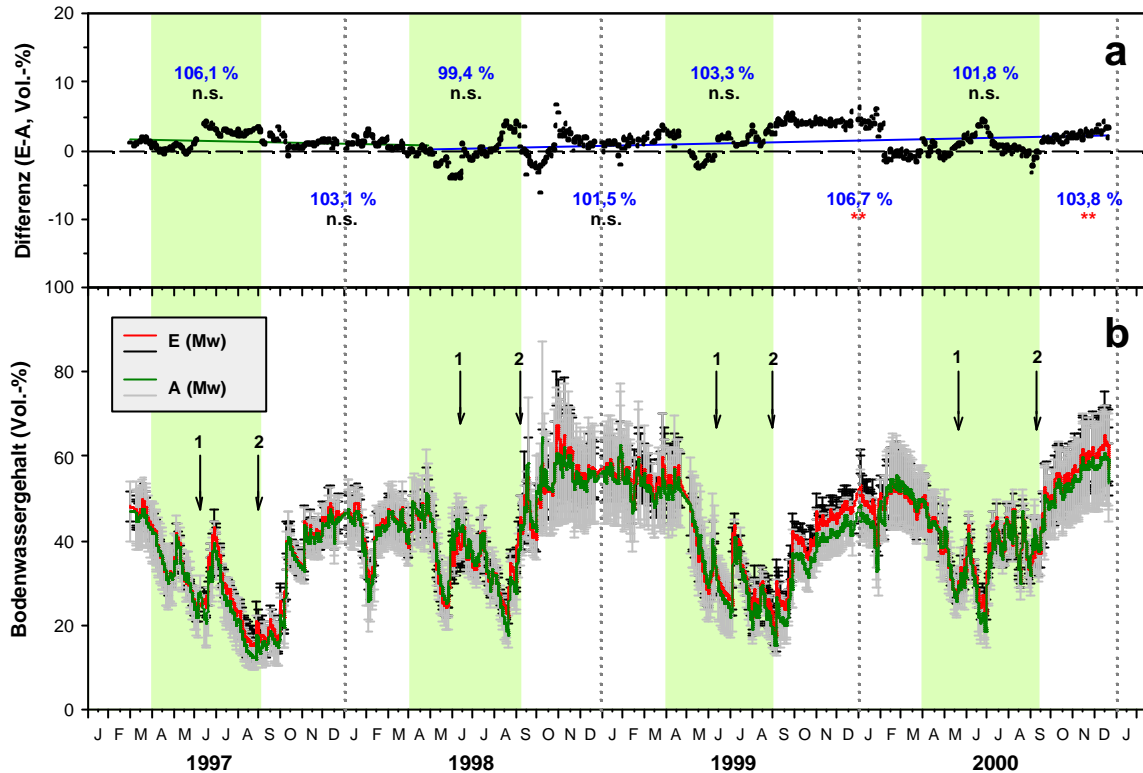


Abbildung 3.1-B: Bodenwassergehalte auf den E- und den A-Flächen vor und nach Beginn der CO₂-Anreicherung **b)** Bodenfeuchte ± Standardabweichung (n=12) pro Tag und CO₂-Behandlung (E: Stabw. schwarz; A: Stabw. grau). Pfeile 1 und 2: erste und zweite Ernte eines Jahres. **a)** Differenzen zwischen dem E- und den A-Wert jedes Meßtages. Blaue Werte: Mittlerer E-Wert der dargestellten Periode (grün oder weiß) in Prozent des mittleren A-Werts; darunter: Ergebnis eines Man-Whitney-Tests dieser Werte. Grüne und blaue Trendlinien: lineare Regressionen der Werte vor und nach CO₂-Anreicherungsbeginn. Grün hinterlegt (**a, b**): Haupt-Vegetationszeit (1. April bis zweite Ernte).

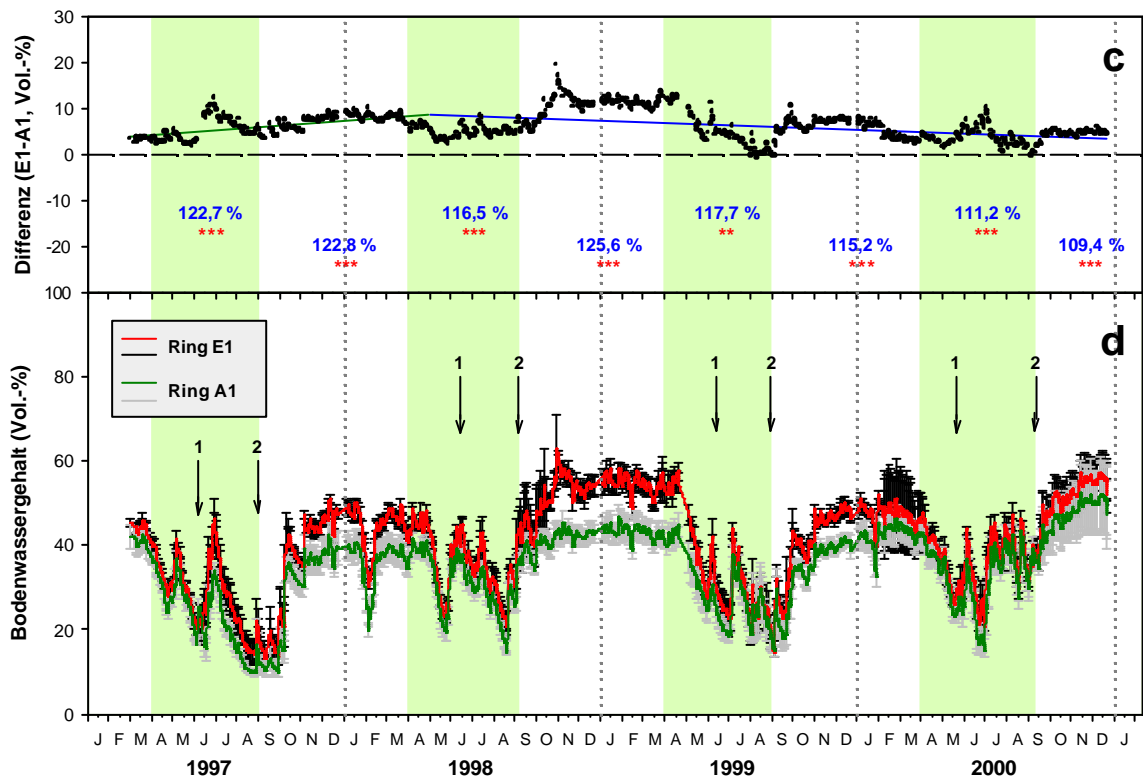


Abbildung 3.1-B: Bodenwassergehalte auf den E1- und den A1-Flächen vor und nach Beginn der CO₂-Anreicherung. **c** und **d** wie **a** und **b**, s.o. Standardabweichung: n=4 pro Meßtag und Ring.

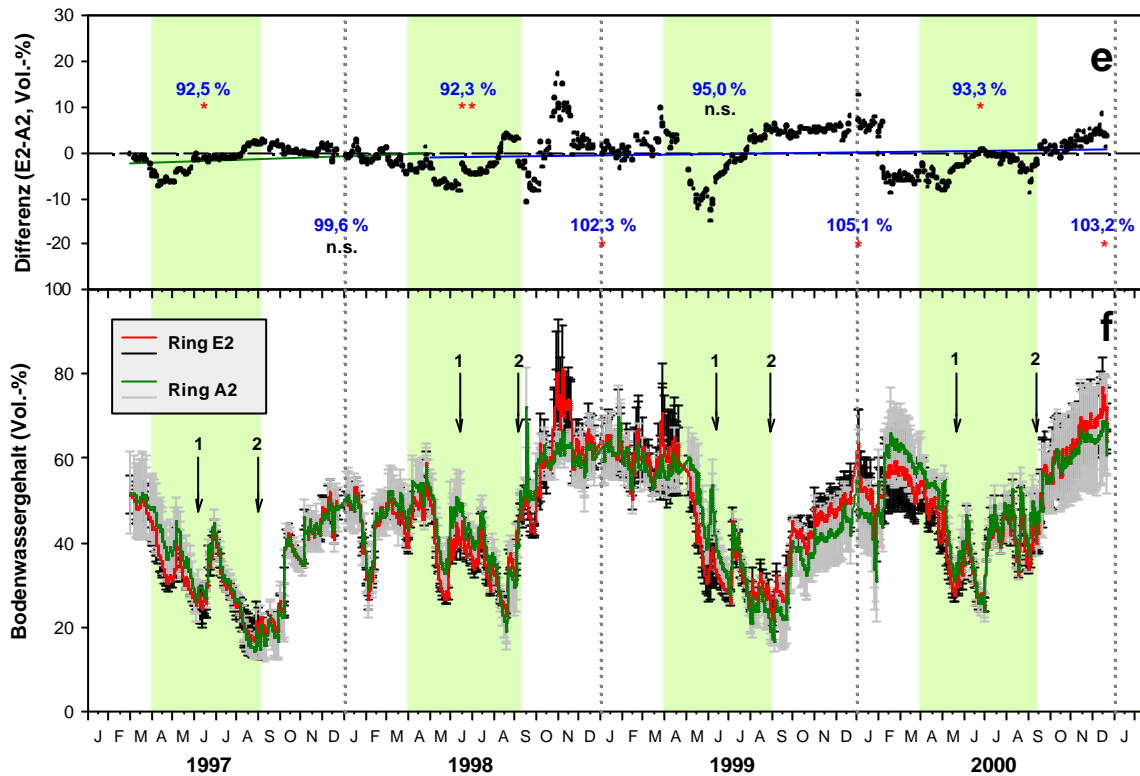


Abbildung 3.1-B: Bodenwassergehalte auf den E2- und den A2-Flächen vor und nach Beginn der CO₂-Anreicherung. e und f wie a und b, s.o. Standardabweichung: n=4 pro Meßtag und Ring. Grüne und blaue Trendlinien: lineare Regressionen der Werte vor und nach CO₂-Anreicherungsbeginn. Grün hinterlegt (a, b): Haupt-Vegetationszeit (1. April bis zweite Ernte).

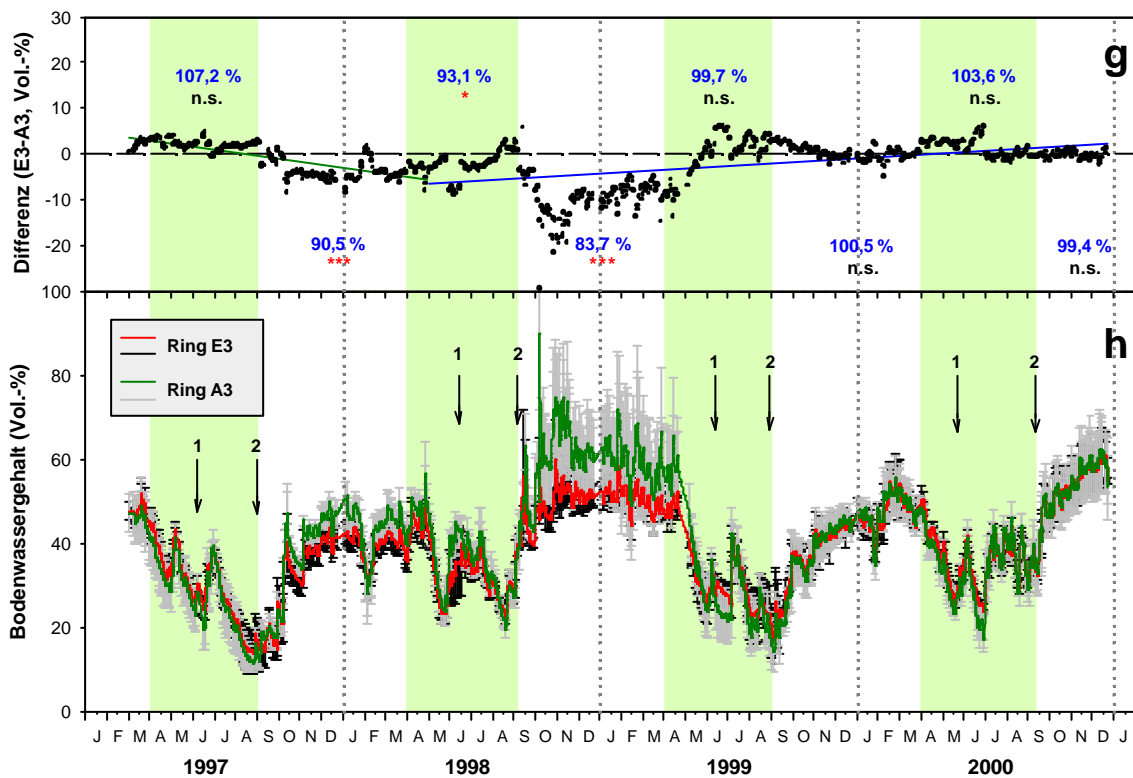


Abbildung 3.1-B: Bodenwassergehalte auf den E3- und den A3-Flächen vor und nach Beginn der CO₂-Anreicherung. g und h wie a und b, s.o. Standardabweichung: n=4 pro Meßtag und Ring. Grüne und blaue Trendlinien: lineare Regressionen der Werte vor und nach CO₂-Anreicherungsbeginn. Grün hinterlegt (a, b): Haupt-Vegetationszeit (1. April bis zweite Ernte).

Im Verlauf der **Bodenfeuchten im Jahresgang** (Abb. 3.1-B, **b, d, f, h**) traten immer wieder bestimmte Grundmuster auf, und doch zeigte jedes Jahr in Abhängigkeit der Niederschlagsmuster einen sehr eigenen Bodenfeuchteverlauf. Gemeinsam ist allen Jahren (Abb. 3.1-B, **b**), daß der Austrieb der Grünland-Vegetation im Frühjahr an der sinkenden Bodenfeuchte zu erkennen ist. Dieser Zeitpunkt lag 1997 schon Ende März (geringe winterliche Niederschläge zuvor), ebenso im Jahr 2000 mit seinen hohen Frühjahrstemperaturen. Im Jahr 1998 hingegen begann das Absinken der Bodenfeuchte erst Ende April, wobei die hohen Herbst-Niederschläge 1998 verzögernd wirkten.

Deutlich war im Jahresgang der Zeitpunkt der ersten Ernte zu erkennen: Nach der Ernte stieg die Bodenfeuchte stets um etwa 15 Vol.-% an, um mit erneutem Aufwuchs der transpirierenden Biomasse oft ebenso rasch wieder zu sinken. Dabei sank die Bodenfeuchte i.d.R. bis zur zweiten Ernte auf noch geringere Werte als vor der ersten Ernte. Besonders ausgeprägt war dies im sehr trockenen Spätsommer 1997, in dem im August/September so gut wie kein Niederschlag fiel (man beachte die fortdauernd geringe Bodenfeuchte auch nach der zweiten Ernte). Nach der zweiten Ernte zeigte sich i.d.R. ein kurzer Anstieg der Bodenfeuchte: 1997 fiel dieser aufgrund der großen Trockenheit sehr gering aus, ebenso 1998; hier allerdings durch die hohen Niederschläge, die die Bodenfeuchte schon vorher hatten ansteigen lassen. In den Jahren 1999 und 2000 war der Anstieg nach der zweiten Ernte deutlicher. Im Winter 1997/1998 sowie im Winter 1999/2000 war in den hohen Bodenfeuchtwerten der Winterperiode in allen Ringen stets ein Ausschlag nach unten festzustellen. Dieser wurde jeweils durch eine kurze Frostperiode verursacht (vgl. Abb. 3.1-C im folgenden Abschnitt). Im Januar/Februar 1998 kühlten Tagesmittel-Lufttemperaturen bis -10 °C den Boden kurzzeitig bis in 5 cm Tiefe unter 0 °C ab (vgl. Vorversuche; in den CO_2 -Ringen wurden in diesem Winter noch keine Bodentemperaturen gemessen). Im Januar 2000 war das Frost-Intermezzo weniger ausgeprägt (Abb. 3.1-C), und senkte die Ring-Bodentemperaturen in 5 cm Tiefe bis etwa 0 °C ab (Abb. 3.1-D, **a**). Das Ausfrieren von Teilen des Bodenwassers bis in 5 cm Tiefe reicht offenbar aus, um einen deutlich sichtbaren Rückgang der Bodenfeuchte um etwa 10 Vol.-% zu bewirken. Obwohl im Winter 1998/1999 ebenfalls zweimal kurze Frostperioden von ähnlicher Intensität wie im Januar 2000 auftraten, war nur bei der zweiten Abkühlung Anfang Februar 1999 ein leichter Rückgang der Bodenfeuchte zu verzeichnen (Temperaturen in 5 cm Tiefe blieben über 0 °C , vgl. Abb. 3.1-D, **a**). Die Ursache für den unterschiedlichen Verlauf der Frostereignisse von Januar 2000 und Februar 1999 dürfte in dem sehr hohen Bodenwassergehalt 1999 zu suchen sein.

Beim Vergleich des Bodenfeuchte-Verlaufs über den Zeitraum März 1997 bis Dezember 2000 müssen vor allem die Vegetationsperioden miteinander verglichen werden, da hier die angesprochenen TDR-Sonden-Probleme kaum eine Rolle spielen können, und zudem unter dem Einfluß der stehenden Vegetation am ehesten Unterschiede unter erhöhtem CO_2 auftreten sollten. Gemittelt über die drei E- und die drei A-Ringe nahm die E-Feuchte gegenüber A in der Vor-Anreicherungs-Periode geringfügig ab (um 0,9 Vol.-%, grüne Trendlinie in Abb. 3.1-B, **a**; $R^2 = 0,06$). Nach

Beginn der Anreicherung stieg sie bis Ende 2000 wieder leicht an (um 1,9 %, blaue Trendlinie, $R^2 = 0,07$). Gemittelt betrug die Differenz zwischen den E- und A-Werten in den dargestellten Zeitperioden (grün oder weiß) nie mehr als 6,7 %. Betrachtet man diese Trendlinien jedoch für die einzelnen Ringpaare (Abb. 3.1-B, c, e, g), so sind die Trends stets verschieden und lassen keine (gleichgerichtete) CO_2 -Wirkung erkennen.

Die Ringe E1 und A1 unterschieden sich von Anfang an signifikant in ihrer Bodenfeuchte (Abb. 3.1-B, c und d). Der Unterschied zwischen beiden war nach Beginn der Anreicherung rückläufig (Trendlinie in Abb. 3.1-B, c), war jedoch bis Ende 2000 signifikant. Bei Ringpaar 2 wies mal E2 und mal A2 die (zuweilen signifikant) höhere Bodenfeuchte auf. Hier besteht eine (sehr geringe) Zunahme-Tendenz (Abb. 3.1-B, e), die jedoch auch vor Anreicherungsbeginn schon existierte. Bei den Ringen E3 und A3 könnte die Abfolge der Vegetationsperioden 1998 bis 2000 als Anstieg der Bodenfeuchte des E3 gewertet werden, wenn nicht bereits 1997 ein größerer Unterschied zwischen E3 und A3 bestanden hätte als er 2000 (wieder) erreicht wurde (vgl. gegenläufige Trendlinien, Abb. 3.1-B, g). Auch hier ist somit kein klarer CO_2 -Effekt erkennbar.

3.1.3 Die Entwicklung der Bodentemperatur in den CO_2 -Ringen

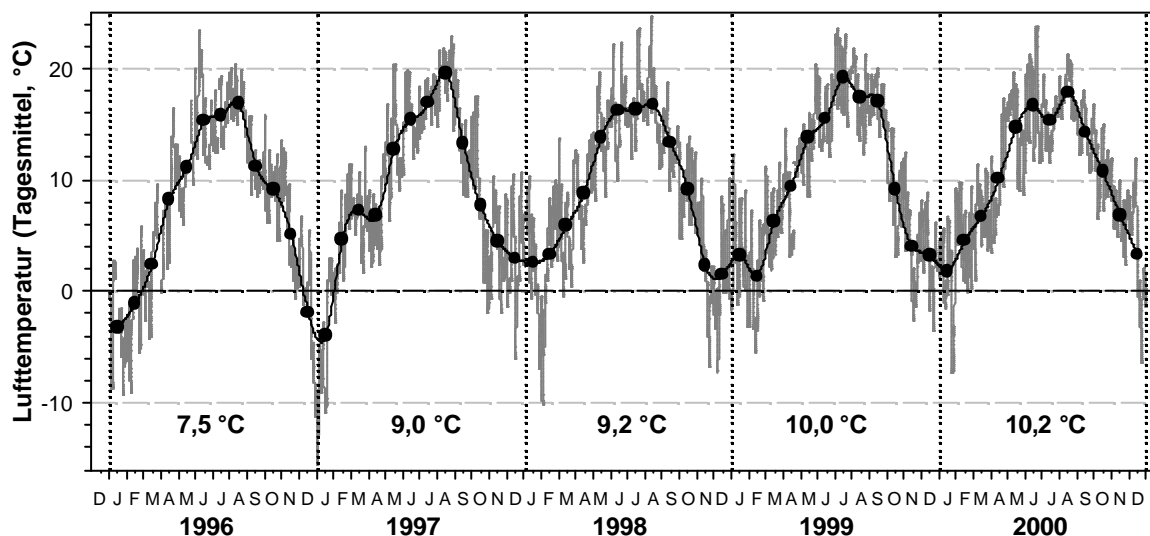


Abbildung 3.1-C: Verlauf der Lufttemperatur in 2 m Höhe auf der Versuchsstation Linden von 1997 bis 2000: Tagesmittel (graue Linie) und Monatsmittel (schwarze Punkte). Zahlen: Jahresmitteltemperatur.

Wie Abb. 3.1-C und (für die Ringe ab April 1998) Abb. 3.1-D zeigen, trat im Verlauf der Untersuchungsperiode keine Frostperiode auf, die in ihrer Stärke und in den Auswirkungen auf den Boden (Durchfrieren bis unter 20 cm Tiefe) dem Frostereignis im Winter 1996/1997 vergleichbar gewesen wäre. Im Winter 1996/1997 lag die Monatsmittel-Temperatur bei zwei Monaten unter Null, was in keinem der folgenden

Jahre zu verzeichnen war. Dadurch, und durch die Anfangsmonate des Jahres 1996, lag die Jahresmitteltemperatur 1996 weit unter dem langjährigen Gießener Mittel.

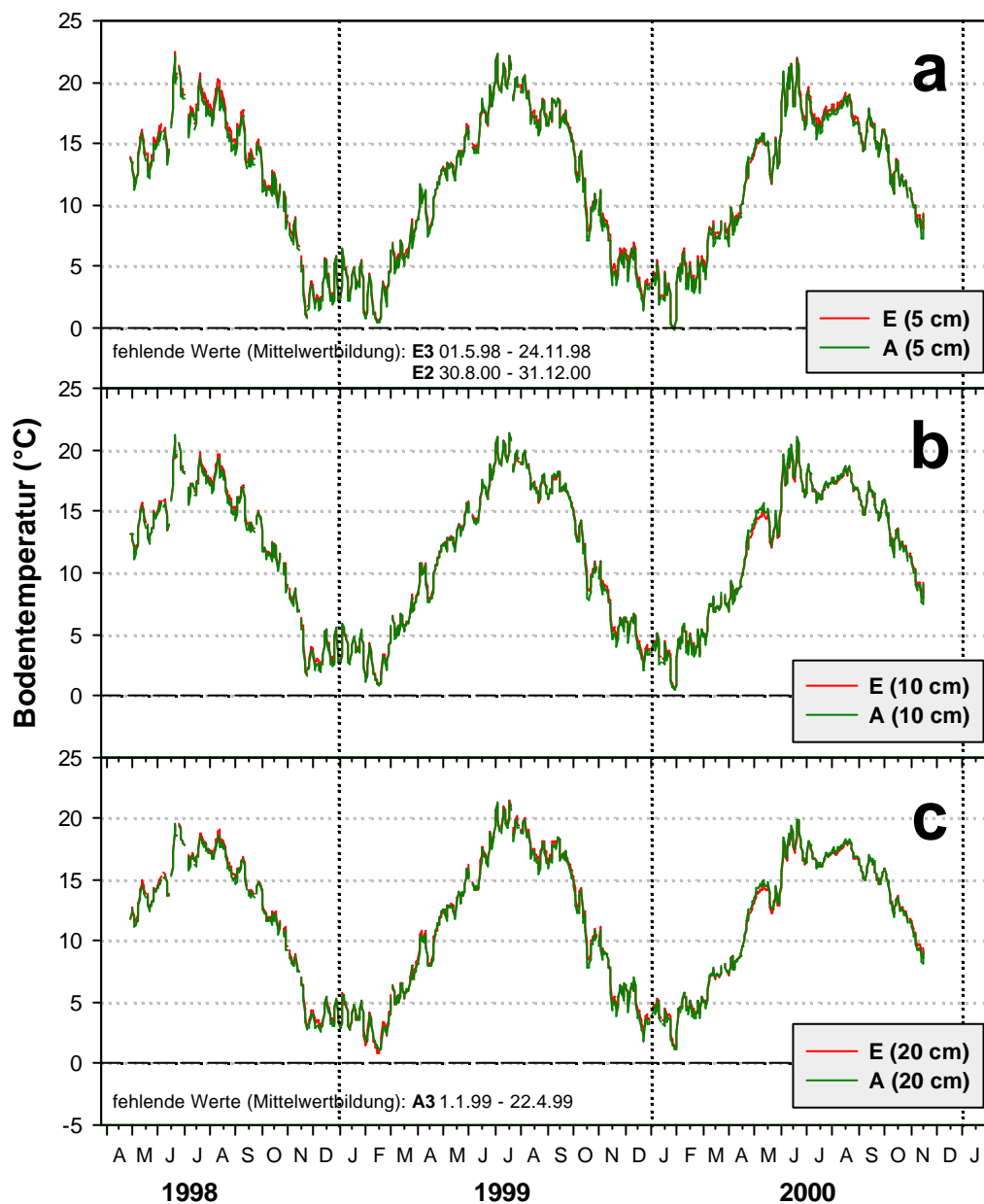


Abbildung 3.1-D: Verlauf der Bodentemperaturen in den E- und den A-Ringen (Tages- und Ringmittel) in 5 cm Tiefe (a), 10 cm Tiefe (b) und 20 cm Tiefe (c).

Die Zeitperioden, in denen die dargestellten Ring-Mittelwerte aus nur zwei gemittelten Ringen bestanden, sind in der Abbildung angegeben.

In Abbildung 3.1-D, a bis c, sind die gemittelten A- und E-Bodentemperaturen seit Beginn der CO₂-Anreicherung dargestellt. Die Unterschiede im Temperaturverlauf zwischen den drei Tiefen waren sehr gering; in 5 cm Tiefe war die Jahresamplitude geringfügig größer als in den Tiefen darunter: So wurden z.B. Ende Januar 2000 in 5 cm Tiefe 0 °C erreicht, nicht aber in den darunter liegenden Tiefen.

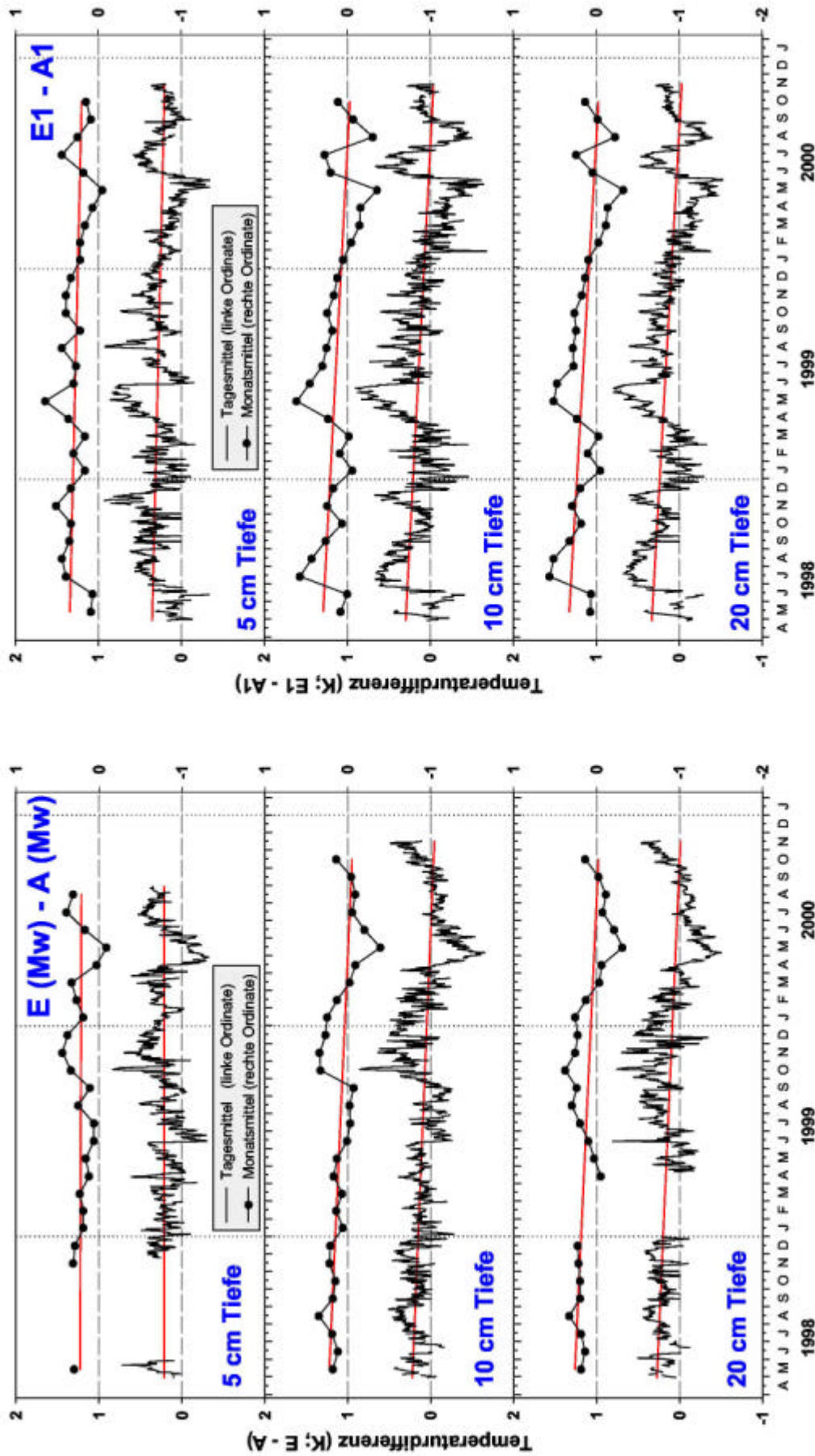


Abbildung 3.1-E: Differenzen der Bodentemperaturen in den E- und A-Ringen in jeweils 5, 10 und 20 cm Tiefe. Jede Graphik: Darstellung von Tages- und Monatsmitteldifferenzen (jede mit eigener Ordinate). Trendlinien in rot (=Regressionslinien). links: wenn die Werte eines Rings fehlten, wurde kein Mittelwert gebildet (=fehlende Daten).

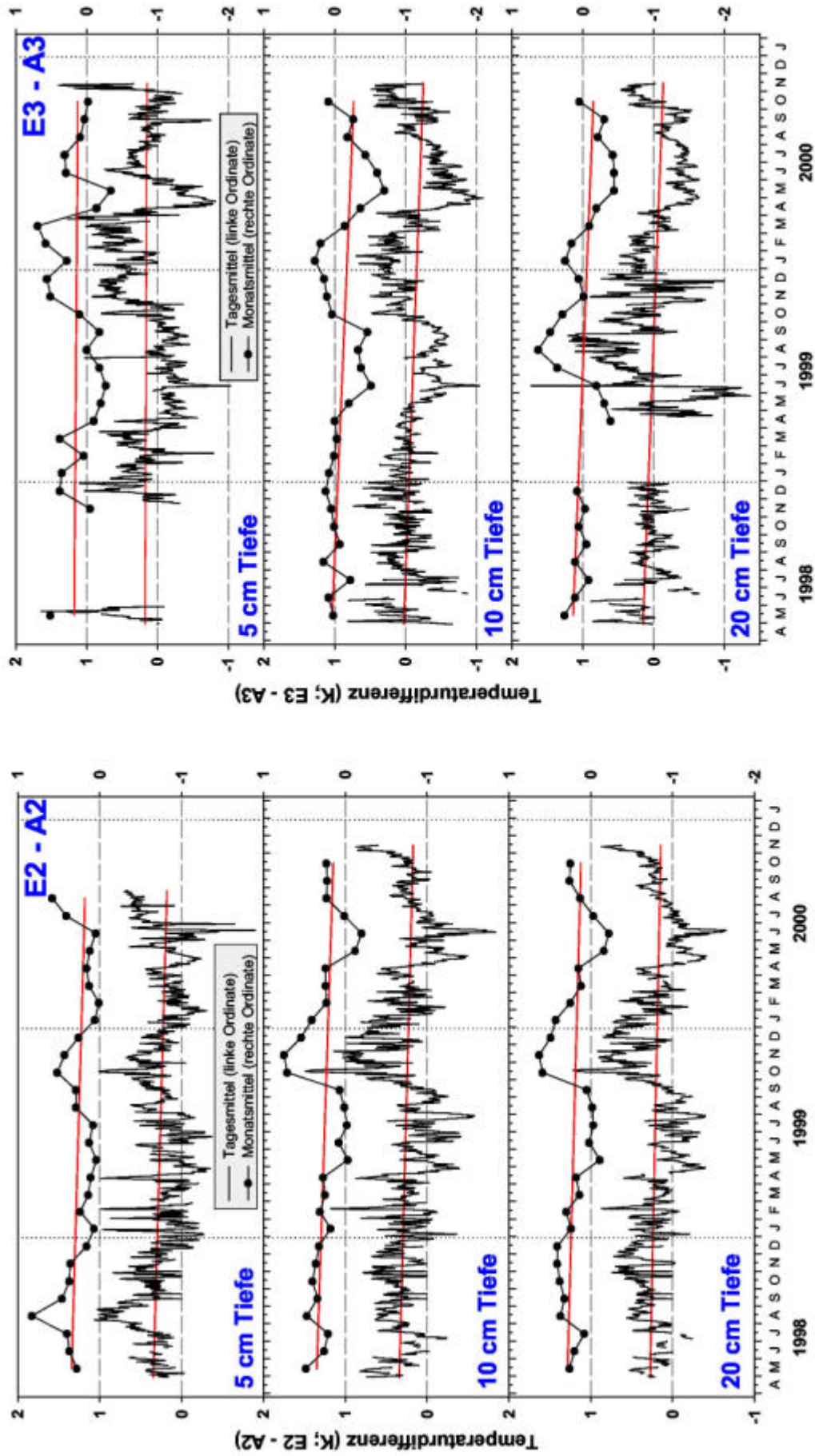


Abbildung 3.1-F: Differenzen der Bodentemperaturen in den E- und A-Ringen in jeweils 5, 10 und 20 cm Tiefe. Jede Graphik: Darstellung von Tages- und Monatsmittel-Differenzen (jede mit eigener Ordinate). Trendlinien in rot (=Regressionslinien).

Die Unterschiede zwischen zwei Ringpartnern betragen zeitweilig bis zu 1,8 °C (E3 minus A3, Abb. 3.1-F, rechts); im Schnitt lagen sie jedoch bei 0,22 °C in 5 cm Tiefe, 0,09 °C in 10 cm Tiefe und 0,12 °C in 20 cm Tiefe (E-Mittelwert minus A-Mittelwert der gesamten dargestellten Meßperiode in Abb. 3.1-E, links).

Die Differenzen-Darstellung des Temperaturverlaufs in den Ringen läßt erkennen, daß seit Beginn der CO₂-Anreicherung eine geringfügige Veränderung in der Temperatur der E-Ringe stattgefunden haben muß (Trendlinien!). Diese war in 10 und 20 cm Tiefe bei jedem der drei Ringpaare ausgeprägter als in 5 cm Tiefe. So betrug die "Abkühlung" der E-Ringe in 5 cm Tiefe gegenüber den A-Ringen nur 0,02°C (Anfangswert der Trendlinie gegenüber ihrem Endwert, Abb. 3.1-E, links) und könnte somit Zufall sein (R² annähernd 0). Dabei zeigten das erste und zweite Ringpaar in 5 cm Tiefe einen leichten Rückgang, Ringpaar 3 hingegen keinen. In 10 cm Tiefe dagegen betrug der mittlere Rückgang der E- gegenüber den A-Temperaturen fast 0,27 °C (R² = 0,25). Dieser Rückgang in 10 cm Tiefe war bei allen drei Ringpaaren gleichermaßen zu verzeichnen und betrug bei den Ringpaaren 1 und 3 etwa 0,3 °C, und bei Ringpaar 2 etwa 0,2 °C. Während in dieser Tiefe E1 und E2 anfangs etwa 0,3 °C wärmer waren als der entsprechende A-Partner, waren E3 und A3 anfangs gleich, Ende 2000 jedoch war E3 um etwa 0,3 °C kälter (Trendlinienwerte). Annähernd gleich verhielt es sich bei allen drei Ringpaaren mit den Temperaturen in 20 cm Tiefe. Hier betrug der mittlere Rückgang der E- gegenüber den A-Temperaturen 0,28 °C (R² = 0,27). Das Bestimmtheitsmaß der Trendlinien (lineare Regressionen) ist nicht sehr groß; jedoch läßt die Gleichartigkeit des Trends über alle Ringpaare auf einen echten CO₂-Effekt schließen. Möglicherweise ist die Bodentemperatur ein sensiblerer Indikator für die Bodenfeuchte- und /oder die LAI-Entwicklung in den Ringflächen als die Messungen dieser Parameter selbst.

In Ringpaar 2 und 3 jedenfalls traten 1999 und 2000 die größten negativen Differenzen in der Bodentemperatur (v.a. in 10 cm Tiefe) auf zum Zeitpunkt großer stehender und transpirierender grüner Biomasse (Mai-Juni-Juli 1999; Mai-Juni 2000). Ringpaar 1 zeigte solch einen Verlauf allerdings nicht; daher muß nicht zwingend eine veränderte Bodenfeuchte die Ursache für den E-Temperatur-Rückgang sein.

3.2 Mineralische N- und organische C-Gehalte des Bodens der CO₂-Ringe

Da in den Ringflächen nur eine begrenzte Menge Boden zur Verfügung stand, wurden seltener als gewünscht Bodenproben entnommen. Daher wurde in der Regel Boden von den "Außenecken" der Kontrollringe (A1 bis A3) genommen, sowie ab der "Freigabe" des Rings E4 Bodenproben aus seiner Innenfläche. Wenn im Rahmen von DEA- oder Nitrifikations-Untersuchungen etwas Boden aus den Ringinnenflächen (je 0 bis 5 cm Tiefe) übrig war, wurde dieser ebenfalls zur N-Analyse genutzt.

3.2.1 N-Gehalte bei der Lagerungsdichte-Bestimmung am 8./9.4.1998

Zu diesem Termin wurde zur Lagerungsdichte-Bestimmung aus jedem der 6 CO₂-Ringe je nach Tiefe an 5 bis 8 Stellen Boden entnommen. Hieraus wurden Mischproben für jeden Ring für die Tiefen 0 bis 2,5, 2,5 bis 5, 5 bis 10 und 10 bis 15 cm hergestellt. Aus jeder Mischprobe wurden 2 Aliquots zur KCl-Extraktion gezogen und ausgeschüttelt. Wie Abb. 3.2-A zeigt, bestanden zu diesem Zeitpunkt vor Beginn der CO₂-Anreicherung (Mai 1998) keine signifikanten Unterschiede in den N-Gehalten der Ringe mit erhöhtem CO₂ (E) gegenüber den Kontrollringen (A). Generell waren alle N_{min}-Gehalte zu diesem Zeitpunkt vor der Düngung sehr gering. Im allgemeinen nahmen die N-Konzentrationen von oben nach unten ab (vgl. hierzu auch die folgenden Abbildungen).

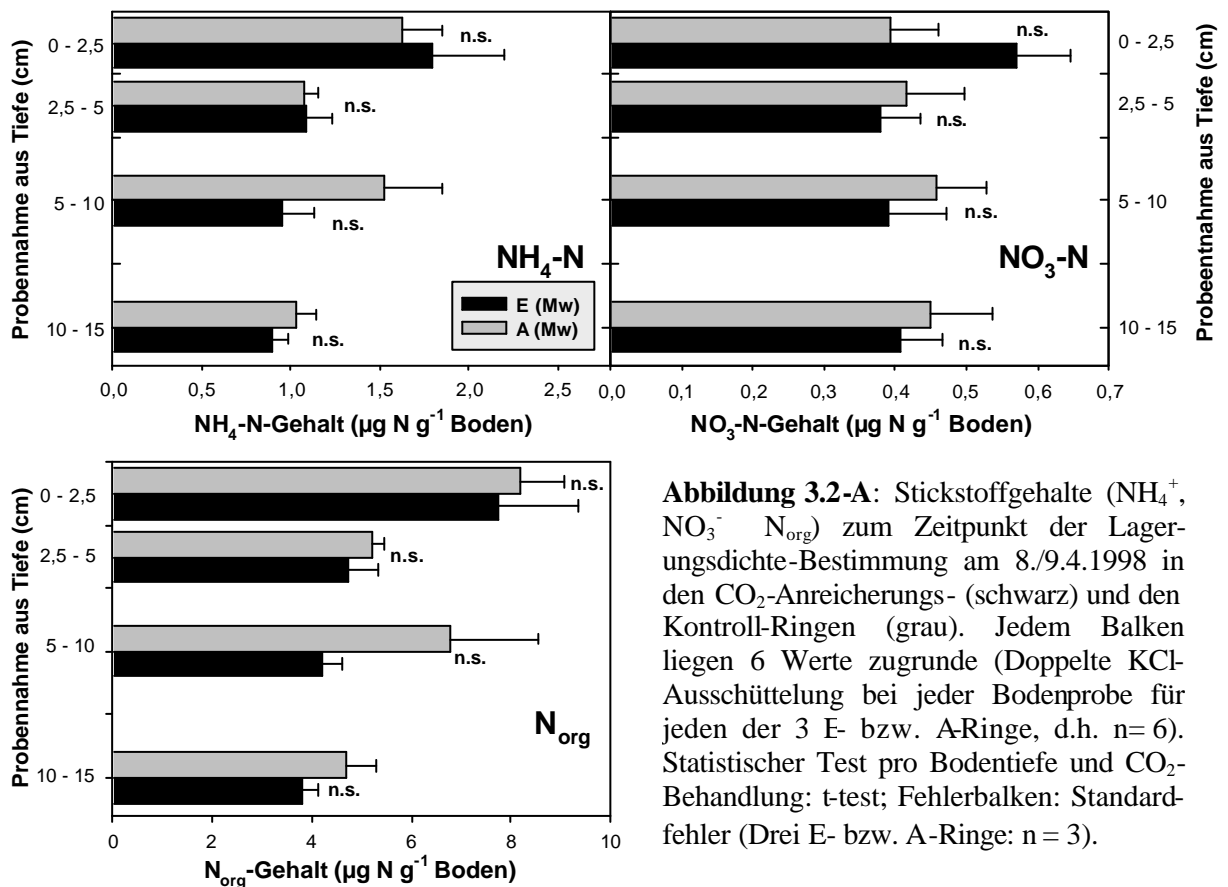


Abbildung 3.2-A: Stickstoffgehalte (NH₄⁺, NO₃⁻, N_{org}) zum Zeitpunkt der Lagerungsdichte-Bestimmung am 8./9.4.1998 in den CO₂-Anreicherungs- (schwarz) und den Kontroll-Ringen (grau). Jedem Balken liegen 6 Werte zugrunde (Doppelte KCl-Ausschüttelung bei jeder Bodenprobe für jeden der 3 E- bzw. A-Ringe, d.h. n=6). Statistischer Test pro Bodentiefe und CO₂-Behandlung: t-test; Fehlerbalken: Standardfehler (Drei E- bzw. A-Ringe: n=3).

3.2.2 N-Gehalte vor und während des laufenden CO₂-Experiments

Wie die Abbildungen 3.2-B bis 3.5-D (jeweils **a** bis **f**) zeigen, waren die Konzentrationen an mineralischem Stickstoff (Ammonium, Nitrat) während des gesamten Jahres im Lindener Grünland stets sehr niedrig. So bewegten sich die Ammonium-Gehalte in 0 - 5 cm Tiefe in der Regel auf einem Niveau von unter 10 µg N g⁻¹ Boden, in 5 - 10 cm Tiefe unter 4 µg g⁻¹ und in 10 - 15 cm Tiefe unter 2 µg g⁻¹ (Abb. 3.2-B). Eine Ausnahme stellt die Phase der sehr starken Herbstniederschläge im Jahr 1998 dar, bei der die NH₄-Gehalte kurzfristig höhere Werte erreichten (wahrscheinliche Ursache: Hemmung der Nitrifikation durch Sauerstoffmangel, daher verzögerter Abbau von NH₄⁺). Die E4-Ammonium-"Ausreißerwerte" im Februar 1999 in 0- 5 und 5- 10 cm Tiefe sind sehr wahrscheinlich darauf zurückzuführen, daß ein Ameisen-Nest bei der Probenahme mit angestoßen und die Erde zur Analyse verwendet wurde. Das gleiche gilt für die E4-Werte von Nitrat und organischem Stickstoff vom gleichen Datum (Abb. 3.2-C und -D). Vergleicht man den Verlauf der NH₄-Gehalte des Bodens unter erhöhtem und aktuellem CO₂, so zeichnet sich keine klare Tendenz hin zu niedrigeren oder höheren Ammonium-Konzentrationen unter erhöhtem CO₂ ab (siehe Abb. 3.2-B, **b**).

Beim **Nitrat** (Abb. 3.2-C) lagen die Werte in 0 – 5 cm Tiefe i.d.R. unterhalb von 2 µg N g⁻¹ Boden, in 5 bis 10 cm Tiefe unterhalb von 1 µg g⁻¹ und in 10 bis 15 cm Tiefe unter 0,5 µg g⁻¹. Eine Ausnahme stellten die Werte vom 30.4.1997 kurz nach der Düngerapplikation dar – hier lagen die Nitratwerte der drei Kontrollflächen (A1 bis A3) etwas über dem beschriebenen Level. Zum Vergleich: Die applizierte Ammoniumnitrat-Düngermenge, 40 kg N ha⁻¹ a⁻¹ (dies entspricht 200 µg Nitrat-N cm⁻²), verteilt auf die ersten 5 cm Tiefe des Bodens, ergäbe (bei rechnerischer Berücksichtigung der Lagerungsdichte, vgl. 3.1) für den A1-Ring einen Gehalt von 39,7 µg N g⁻¹ Boden, für A2 60,2 µg g⁻¹ und für A3 63,7 µg g⁻¹. Verteilte man die applizierte Nitrat-Menge vertikal gleichmäßig auf die obersten 15 cm des Bodens, so ergäben sich Gehalte von 10,2 µg g⁻¹ für den A1-, 14,6 µg g⁻¹ für den A2- und 14,8 µg g⁻¹ für den A3-Ring. Die hier für den 30.4.1997 dargestellten Werte sind, obwohl nur sechs Tage nach der Düngung gemessen, sehr viel geringer. Auch hier ist, wie beim NH₄⁺, kein Trend einer CO₂-Beeinflussung der Werte zu erkennen (vgl. Abb. 3.2-C **d**). Allenfalls scheinen die Nitrat- und auch die Ammonium-Konzentrationen unter erhöhtem CO₂ in 5 bis 10 und 10 bis 15 cm Tiefe etwas niedriger zu sein.

Der Gehalt an KCl-extrahierbarem, **organischen Stickstoff** lag in 0 bis 5 cm Tiefe i.d.R. um die 20 µg N g⁻¹ Boden, in 5 bis 10 cm Tiefe unter 10 µg g⁻¹ und in 10 bis 15 cm Tiefe um die 4 µg g⁻¹. Auch bei N_{org} sind die E4-"Ausreißerwerte" wie bei NH₄⁺ und NO₃⁻ am 12.2.1999 sehr wahrscheinlich auf das Ameisennest in der Probe zurückzuführen. Auch beim organischen Stickstoff ist kein klarer Trend einer Beeinflussung durch erhöhtes CO₂ feststellbar. Eventuell zeichnet sich v.a. gegen Ende der Messungen eine leichte Erhöhung der N_{org}-Gehalte unter erhöhtem CO₂ ab. Für eine klare Aussage durch Weiterbeobachtung des Trends hätten die Messungen jedoch weiter fortgeführt werden müssen.

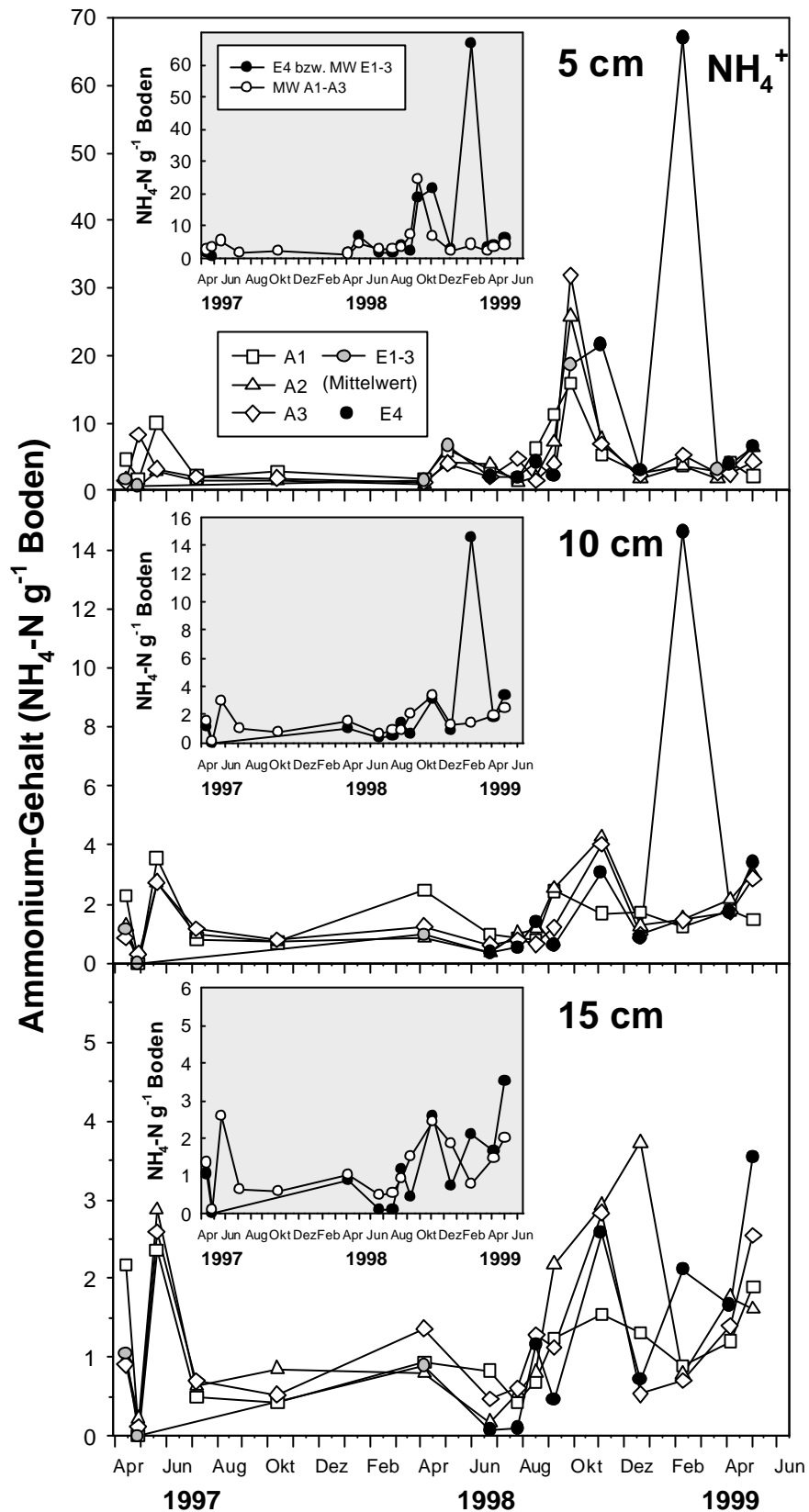


Abbildung 3.2-B: Ammonium-Gehalte des Bodens in den CO_2 -Ringen in verschiedenen Tiefen im Untersuchungszeitraum. In den großen Graphiken: Graue Kreise = Mittelwert aus den Ringen E1 bis E3; schwarze Kreise = Wert aus dem Ring E4. Legenden große und kleine Graphiken: gelten für alle Tiefen. Ordinatenkalierung für die drei Tiefen unterschiedlich.

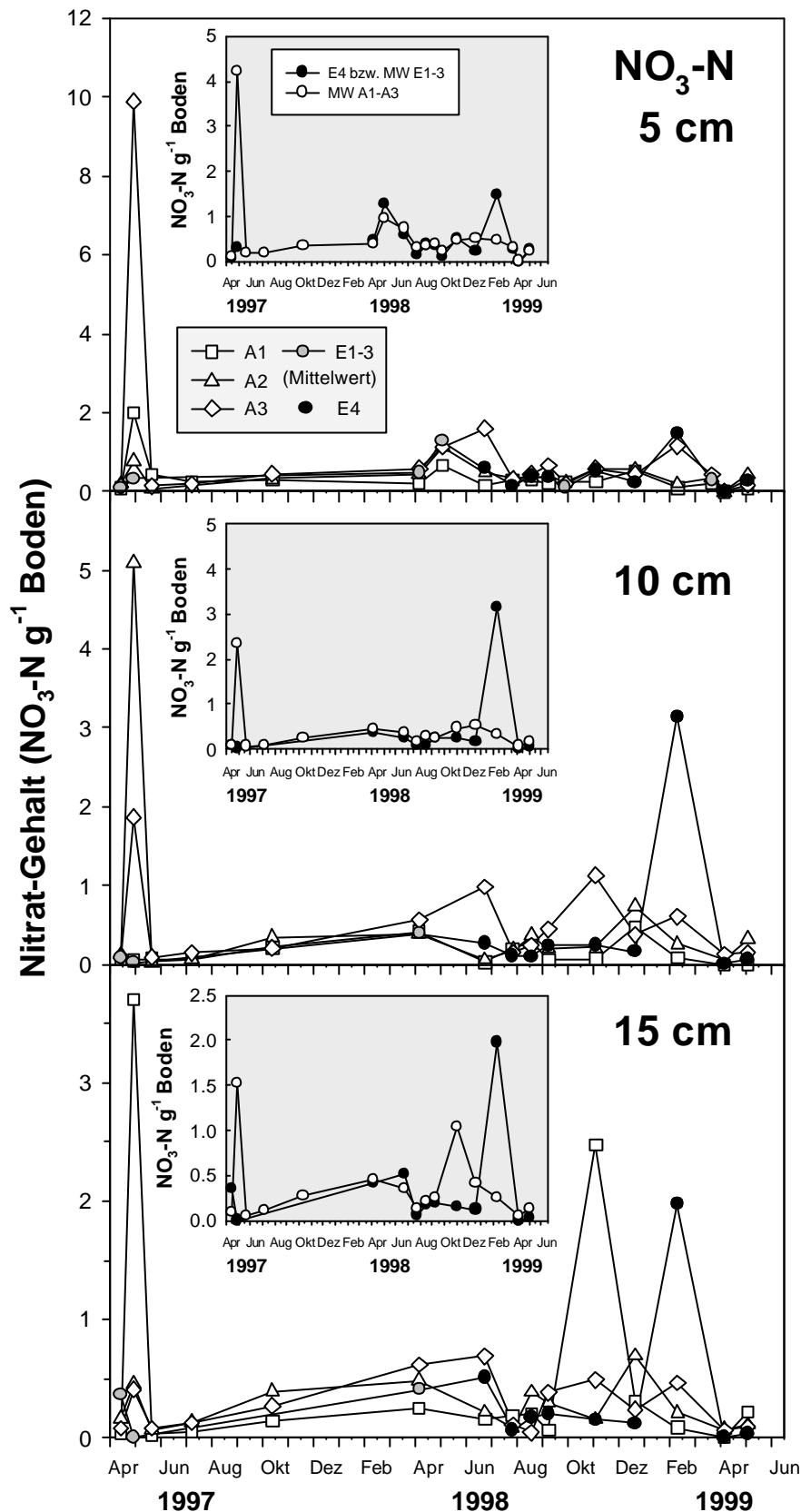


Abbildung 3.2-C: Nitrat-Gehalte des Bodens in den CO_2 -Ringen in verschiedenen Tiefen im Untersuchungszeitraum. In den großen Graphiken: Graue Kreise = Mittelwert aus den Ringen E1 bis E3; schwarze Kreise = Wert aus dem Ring E4. Legenden große und kleine Graphiken: gelten für alle Tiefen. Ordinaten-skalierung für die drei Tiefen unterschiedlich.

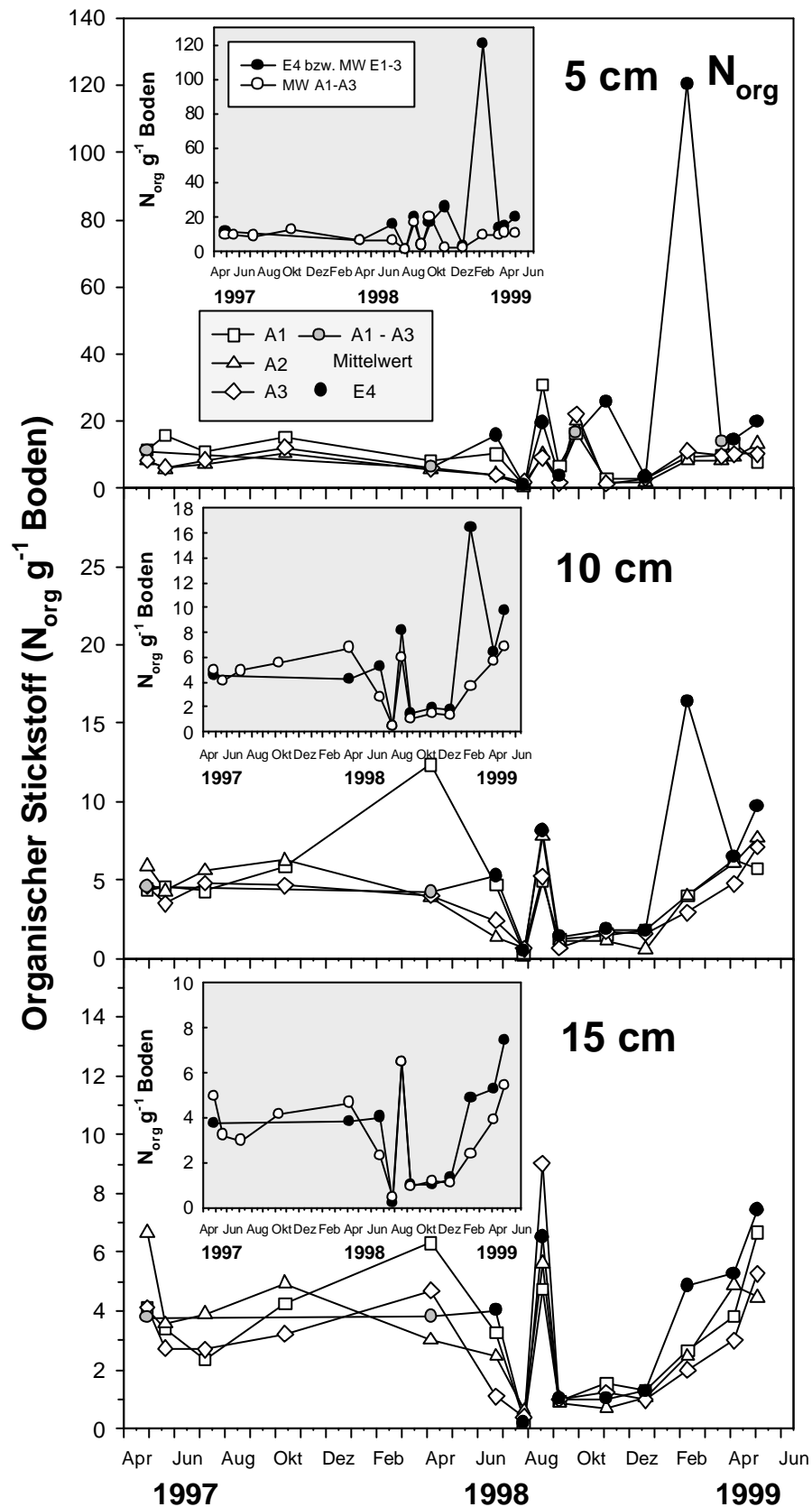


Abbildung 3.2-D: Konzentration organischen Stickstoffs in den CO₂-Ring in verschiedenen Tiefen im Untersuchungszeitraum. In den großen Graphiken: Graue Kreise = Mittelwert aus den Ringen E1 bis E3; schwarze Kreise = Wert aus dem Ring E4. Legenden große und kleine Graphiken: gelten für alle Tiefen. Ordinatenkalierung für die drei Tiefen unterschiedlich.

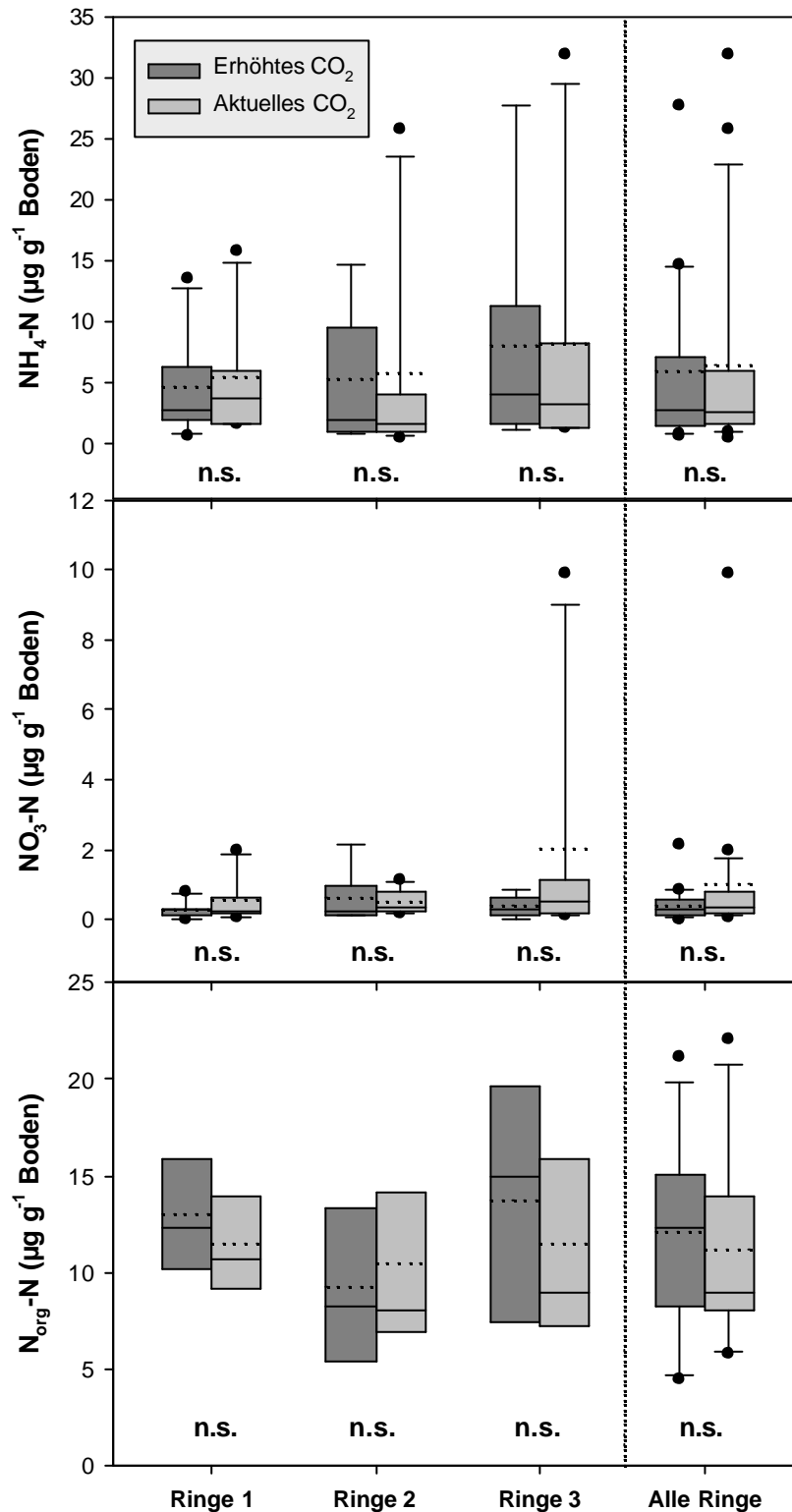


Abbildung 3.2-E: Stickstoffgehalte (NH₄, NO₃, N_{org}) in 0 bis 5 cm Tiefe über den Untersuchungszeitraum (Probenahmen: 15. und 30.4.1997; 8.4., 6.5. und 30.9.1998 und am 25.3.1999). Die Proben wurden *innerhalb* der Ringe (bei Lagerungsdichte- oder DEA-Untersuchungen) entnommen. Die höchsten gemessenen Werte (v.a. bei Nitrat) stammen vom 30.4.1997 kurz nach Düngerapplikation. Es ergaben sich keine signifikanten Unterschiede (*p*-Werte >0,3) mittels *t*-test (*n*-Zahlen Ringe 1-3 bei NH₄ und NO₃: je 6, bei N_{org}: je 4; "alle Ringe" bei NH₄ und NO₃: je 18, bei N_{org}: je 12).

Da bei keiner der drei gemessenen Stickstoff-Formen eine CO_2 -Beeinflussung zu existieren scheint, wurden die in nur 0–5 cm Tiefe in den E- und A-Ringen während des *gesamten* Untersuchungszeitraums gemessenen Werte verglichen (einschl. 1997, Abb. 3.2-E). Dabei bestätigt sich das Ergebnis vom 08./09.04.1998 (Abb. 3.2-A): Es existierten im Mittel keine signifikanten Unterschiede zwischen den CO_2 -Behandlungs-Flächen. Falls es unter erhöhtem CO_2 Unterschiede in den N-Umsatzraten geben sollte, zeigen diese sich jedenfalls nicht in den statischen Pool-Größen NH_4^+ -, NO_3^- - und N_{org} -Gehalt.

3.2.3 Wasserlöslicher organischer Kohlenstoff (KCl-Extraktion)

Analysen der KCl-Bodenextrakte auf den Gehalt an wasserlöslichen organischen Kohlenstoff wurden aufgrund der unter 2.6.2 beschriebenen Gegebenheiten nur von folgenden Probenahmen durchgeführt: Probenahmen in E4 sowie A1 bis A3 (Ecken) am 12.02., 09.04. und 07.05.99 (0 bis 5, 5 bis 10 und 10 bis 15 cm Tiefe) und Probenahmen zur DEA-Messung *in* den Ringen E1 bis E3 sowie A1 bis A3 (0 bis 5 cm Tiefe) am 25.03. und 09.06.99.

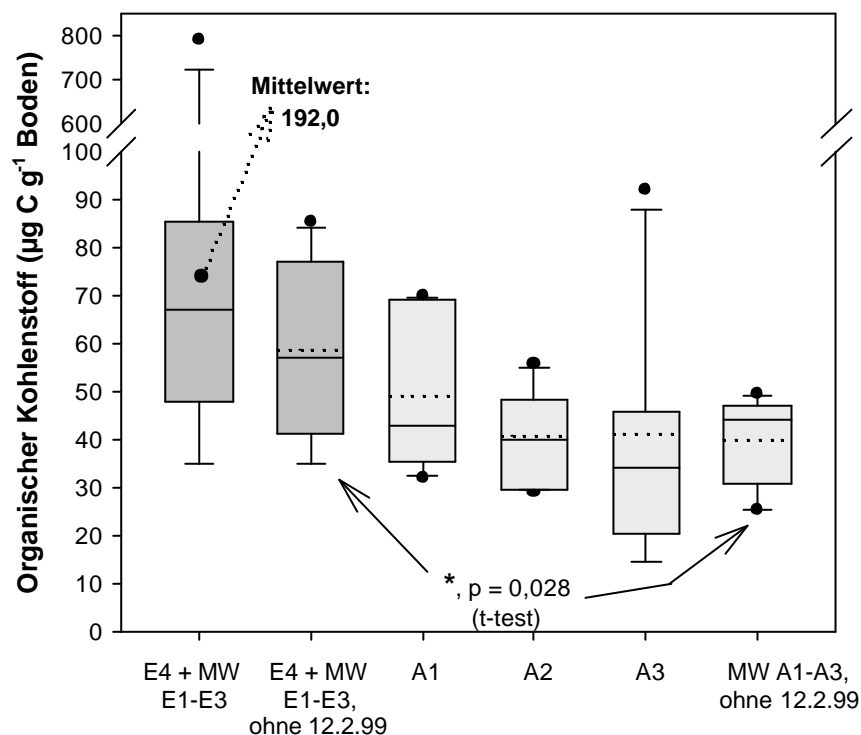


Abbildung 3.2-F: Gehalt an organischem Kohlenstoff in 0 bis 5 cm Tiefe. In die E-Boxen links gingen sowohl die E4- als auch die E1- bis E3-Mittelwerte ein. T-Test: E-Werte sowie A-Mittelwerte ohne die Analyse am 12.2.99 (siehe Text).

Wie Abb. 3.2-F zeigt, waren die E4- bzw. E1- bis E3-Mittelwert-Gehalte an organischem Kohlenstoff während des Messzeitraums grundsätzlich höher als die C_{org} -Gehalte der Kontrollflächen, selbst wenn die E4-Werte vom 12.02.1999 ausgeschlossen werden.

Bei dieser Probenahme wurde das Ameisennest mit angestochen, was höchstwahrscheinlich auch die Ursache der sehr hohen C_{org} -Werte war. Aber auch ohne den 12.2.99 sind die E-Werte signifikant höher als die gemittelten A-Werte (Abb. 3.2-F).

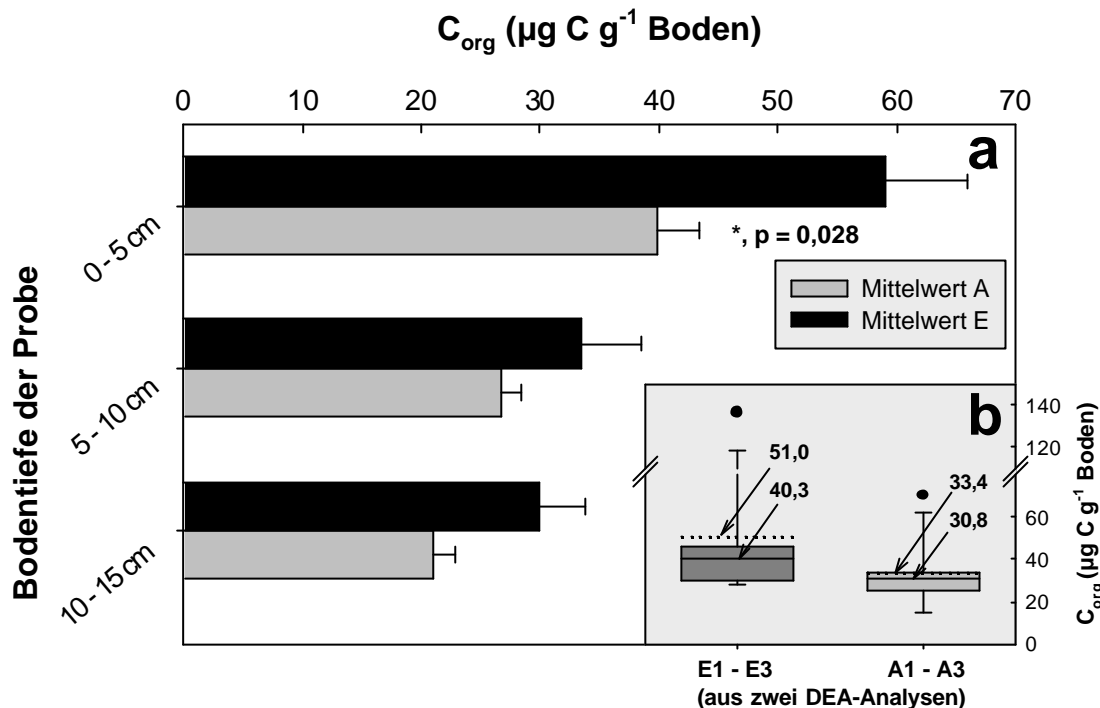


Abbildung 3.2-G: a) C_{org} -Gehalt während des Untersuchungszeitraums (ohne die Werte vom 12.2.99) in allen 3 Tiefen unter erhöhtem (E) und aktuellem CO_2 (A). In 5 cm Tiefe: 8 Einzelwerte, in 10 und 15 cm Tiefe je 4 Einzelwerte. Fehlerbalken: Standardfehler.

b) C_{org} -Gehalte aller E bzw. A-Werte von 0 bis 5 cm Tiefe direkt in den Ringen während zweier DEA-Probenahmen. Gestrichelte Linie: Mittelwert, Durchgezogene Linie: Medianwert (Pfeile: Zahlenwerte von Mittel- und Medianwerten), n = 12 pro CO_2 -Behandlung.

Die Gehalte an wasserlöslichem organischem Kohlenstoff waren, wie Abb. 3.2-G, a zeigt, nicht nur in 0 bis 5 cm Tiefe signifikant höher unter erhöhtem CO_2 . Auch den Tiefen darunter waren sie stets höher; leider reichte die Anzahl der Probenahmen nicht für statistische Tests aus. In Abb. 3.2-G, b sind Probenahmen direkt aus den Innenflächen der drei E- und A-Ringe im Rahmen der beiden DEA-Untersuchungen dargestellt. Obwohl hier keine signifikanten Unterschiede bestehen ($p = 0,141$, Mann-Whitney-Test), ist der E-Mittelwert doch um 52,9% höher als der A-Mittelwert.

Bezieht man die C_{org} -Gehalte nicht auf das Bodengewicht ($\mu\text{g C g}^{-1}$ Boden, Abb. 3.2-G), sondern auf das Bodenvolumen ($\mu\text{g C cm}^{-3}$ Boden), so bleibt dieses Verhältnis (E>A) bestehen: Auch hier ist der Unterschied nicht signifikant ($p = 0,157$, Mann-Whitney-Test); dennoch ist der E-Mittelwert um 39,5% und der E-Median um 42,5% höher als der A-Mittelwert bzw. der A-Median. Die Umrechnung von $\mu\text{g C g}^{-1}$ auf $\mu\text{g C cm}^{-3}$ erfolgte mittels der Lagerungsdichte-Mittelwerte der CO_2 -Anreicherungsringe (vgl. Tab. 3.1-A).

3.3 Biomasse-Erträge vor und nach Beginn des FACE-Experiments

3.3.1 Erträge in Abhängigkeit von der Witterung

Da HEINZ (2000) bereits zeigen konnte, daß nur eine relativ geringe Abhängigkeit der Erträge von der (sehr ähnlichen) Jahresmitteltemperaturen existierte, wird dieser Zusammenhang nicht näher analysiert. Es bestand aber eine höchstsignifikante Korrelation mit der zwischen den beiden Ernten gefallenen Niederschlagsmenge (Abb. 3.3-A).

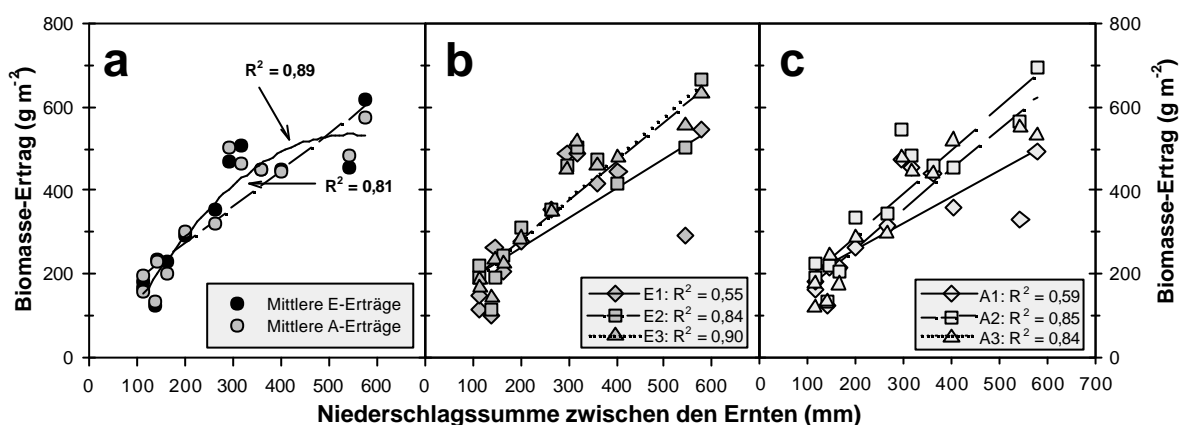


Abbildung 3.3-A: Höhe des oberirdischen Biomasse-Ertrags in Abhängigkeit von der Summe des zwischen den Ernten gefallenen Niederschlags. **a)** Mittelwerte der A- und E-Erträge mit Regressionen erster und zweiter Ordnung; **b)** Erträge der Flächen E1 bis E3, **c)** Erträge der Flächen A1 bis A3.

Die gemittelten Erträge der E- und der A-Flächen unterschieden sich in ihrer Abhängigkeit vom Niederschlag fast nicht (R^2 um 0,01 verschieden), daher wurden in Abb. 3.3-A, **a**, die Daten zusammengefaßt. Die Korrelation ist besser, wenn man eine Art Sättigungskurve annimmt (Regression zweiter Ordnung in **a**). Wurden die Einzel-Ernten (in Juni und September) getrennt betrachtet, so war die Korrelation vor allem für die erste Ernte deutlich schlechter (nicht gezeigt, $R^2 = 0,4$; zweite Ernte: $R^2 = 0,77$; vgl. HEINZ 2000). Die Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge war bei den Einzelringen jeweils ähnlich stark ausgeprägt; die schlechtere Korrelation der E1- bzw. K1-Fläche war auf den "Ausreißer-Wert" der Juni-Ernte 1999 zurückzuführen. Nimmt man diese beiden Werte heraus, verbessern sich die Korrelationen auf $R^2 = 0,74$ (E1) und $0,78$ (A1). Es ist jedoch unklar, warum der Juni-Ertrag 1999 bei Ringpaar 1 so niedrig war.

3.3.2 Erträge der Gesamt-Biomasse

Gemittelt über alle drei Ringpaare betrachtet, gab es vor Beginn der CO_2 -Anreicherung bis auf zwei Ausnahmen keinen signifikanten Unterschied im Ertrag der Einzelernten zwischen den (späteren) Kontrollflächen A1 bis A3 und den zur CO_2 -Anreicherung ausgewählten Flächen E1 bis E3. Die Ausnahmen waren die September-Ernten 1994 bzw. 1997, bei denen der Ertrag der Kontrollflächen jeweils höchstsignifikant bzw.

signifikant größer war als der der E-Flächen (Abb. 3.3-B, a; Tab. 3.3-A). Bei den Jahres-Erträgen (Summe der ersten und zweiten Ernte) traten vor Beginn der CO₂-Anreicherung keinerlei signifikante Unterschiede auf, wobei der Ertrag der A-Flächen in jedem Jahr etwas höher war als der der E-Flächen (Abb. 3.3-B, b).

Nach Beginn der CO₂-Anreicherung erfolgte zunächst keine Veränderung, d.h. es waren weiterhin keine signifikanten Unterschiede vorhanden. Ab der Ernte im September 1999 jedoch war, erstmalig seit Beginn der Beobachtungen im Jahre 1993, der Ertrag der E-Flächen signifikant größer als der der A-Flächen. Dieser Trend setzte sich im Jahr 2000 fort (Abb. 3.3-B, a); in diesem Jahr waren beide Einzel-Ernten, und in Folge die Jahreserträge, auf allen E-Flächen signifikant höher. Noch nie seit Beginn der Messungen 1993 war die Differenz zwischen E und A-Flächen (absolut wie prozentual) so groß wie 2000: Der E-Ertrag war um 9,8 % höher als der A-Ertrag (Abb. 3.3-B, b).

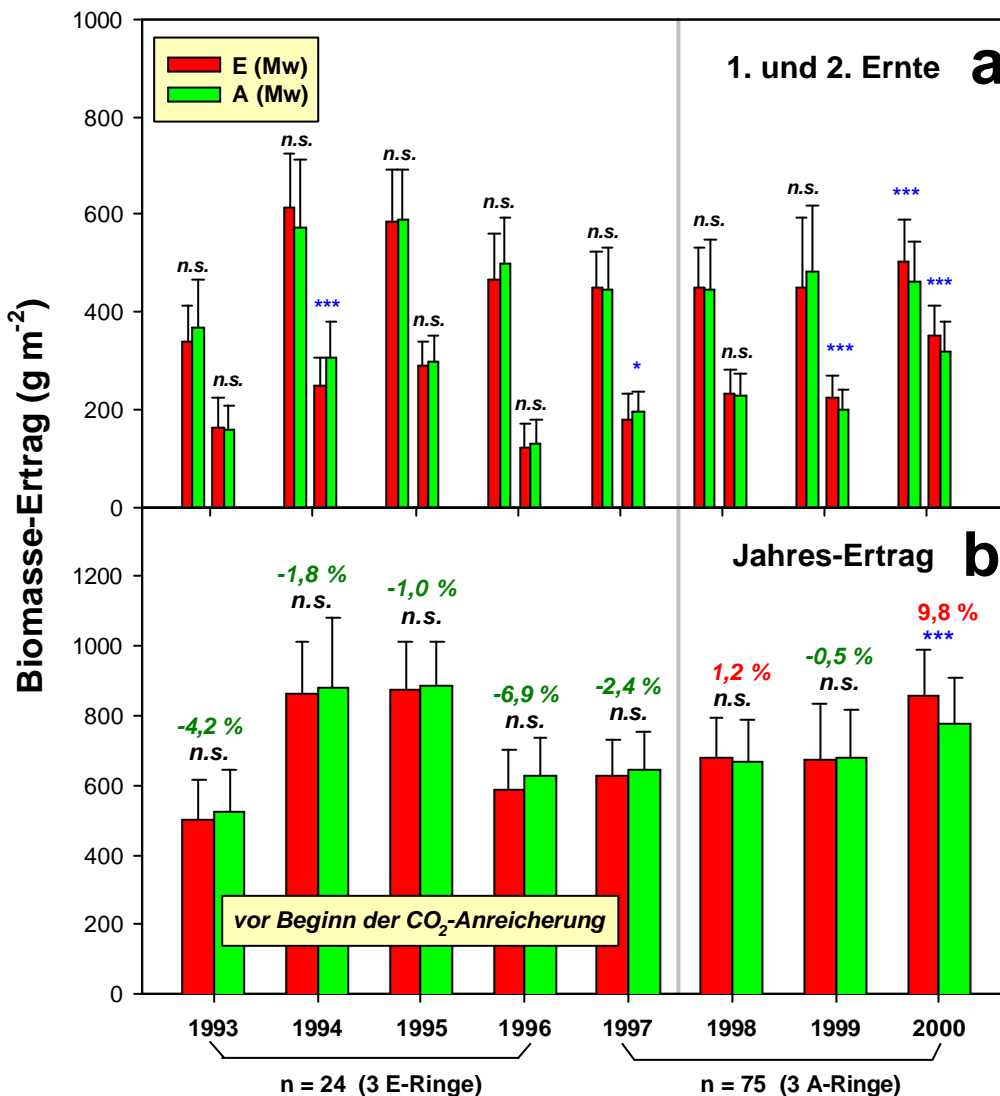


Abbildung 3.3-B: Oberirdischer Biomasse-Ertrag (Gräser, Kräuter, Leguminosen) der E- und A-Behandlung, Fehlerbalken: Standardabweichung. a) Einzel-Ernten; b) Jahreserträge. Prozentwerte oberhalb der Säulen: Ertrags-Differenz zwischen den E- und A-Flächen (E – A; in % des A-Ertrags). Signifikanz-Tests: t-test (n = 24 bzw. n = 75 pro Behandlung). n.s. = nicht signifikant; * = signifikant (P: 0,05 – 0,01); ** = hochsignifikant (P: <0,01 – 0,001); *** = höchstsignifikant (P <0,001). P-Werte der dargestellten t-tests: siehe Tabelle 3.3-A.

Die Frage ist nun, ob diese Entwicklung bei allen Ringpaaren (1 bis 3) gleichartig erfolgte, oder ob dieses Ergebnis vor allem der Mittelwertbildung zu verdanken ist. Letzteres war nicht der Fall (vgl. auch Tab. 3.3-A): Bei den Ringpaaren 1 und 2 traten vor Beginn der CO₂-Applikation fast nie signifikante Unterschiede auf (Abb. 3.3-C, 3.3-D). Falls es doch einen signifikanten Unterschied gab, so war stets der A-Ertrag größer als der E-Ertrag.

Eine Ausnahme stellen die ersten drei Einzel-Ernten des Ringpaares 3 dar: Hier wies E3 im Juni 1993, im September 1993, sowie Juni 1994 die signifikant höheren Erträge auf (Abb. 3.3-E). Danach war mal der Ertrag der E3-Fläche höher, mal der der A3-Fläche, aber stets war der Unterschied zwischen E3 und A3 nicht signifikant.

Nach Beginn der CO₂-Anreicherung war der Ertrag der E1-Fläche 1998 bei beiden Ernten höchstsignifikant größer als der der A1-Fläche (Abb. 3.3-C; Tab. 3.3-A). Im folgenden Jahr gab es keinen signifikanten Unterschied mehr, im Jahr 2000 dagegen wieder eine Signifikanz zugunsten des E1-Rings. Beim zweiten und dritten Ringpaar war die Reaktion weniger rasch, aber bei beiden war die gleiche Tendenz feststellbar (Abb. 3.3-D, 3.3-E): Von einer höheren Erntebiomasse des A-Rings im Jahre 1998 (Ringpaar 2: signifikant) hin zu einer höheren Biomasse des E-Rings im Jahr 2000 (Ringpaar 3: signifikant). Damit zeigte jedes der drei Ringpaare mehr oder weniger deutlich die gleiche langfristige Tendenz einer positiven CO₂-Wirkung.

Tabelle 3.3-A: Unterschiede in der Gesamtbiomasse (t-tests) der Jahre 1993 bis 2000: Vergleiche der Ringpaare bzw. der für die CO₂-Ringe vorgesehenen Flächen. Jahre 1993 bis 1996: n = 8 pro Fläche und Ernte; Ab 1997: n = 25 pro Ring und Ernte; Mai 1998: Beginn der CO₂-Anreicherung.

n.s. = nicht signifikant; * = signifikant (P: 0,05 – 0,01); ** = hochsignifikant (P: <0,01 – 0,001); *** = höchstsignifikant (P < 0,001); ^R: nicht-parametrischer Man-Whitney-Test verwendet.

In Klammern hinter Signifikanzstern(en): Ring bzw. Fläche mit dem höheren Ertrag.

Jahr	Erste Ernte (Juni), Ringpaare				Zweite Ernte (Sept.), Ringpaare				Gesamt-Ernte, Ringpaare			
	1	2	3	alle	1	2	3	alle	1	2	3	alle
1993	n.s. 0,192	** ^(A) 0,002	* ^(E) 0,019	n.s. 0,263	n.s. 0,053	n.s. 0,997	* ^(E) 0,014	n.s. 0,735	* ^(A) 0,012	** ^(A) 0,008	** ^(E) 0,007 ^R	n.s. 0,468
1994	n.s. 0,372	n.s. 0,613	* ^(E) 0,043	n.s. 0,237	n.s. 0,098	*** ^(A) <0,001	n.s. 0,104	** ^(A) 0,005	n.s. 0,893	n.s. 0,086	n.s. 0,211	n.s. 0,727
1995	n.s. 0,927	n.s. 0,281	n.s. 0,328	n.s. 0,931	n.s. 0,689	n.s. 0,252	n.s. 0,813	n.s. 0,710	n.s. 0,957	n.s. 0,837	n.s. 0,408	n.s. 0,827
1996	n.s. 0,796	n.s. 0,093	n.s. 0,407	n.s. 0,307	n.s. 0,277	n.s. 0,488	n.s. 0,699	n.s. 0,605	n.s. 0,907	n.s. 0,110	n.s. 0,651	n.s. 0,336
1997	n.s. 0,352	n.s. 0,536	n.s. 0,368	n.s. 0,868	** ^(A) 0,008	n.s. 0,523	n.s. 0,295	* ^(A) 0,041	n.s. 0,099	n.s. 0,826	n.s. 0,750	n.s. 0,396
1998 +CO ₂	*** ^(E) <0,001	n.s. 0,151	n.s. 0,079	n.s. 0,892 ^R	*** ^(E) <0,001	n.s. 0,058	n.s. 0,118 ^R	n.s. 0,641	*** ^(E) <0,001	* ^(A) 0,048	n.s. 0,070	n.s. 0,683
1999 +CO ₂	n.s. 0,111	* ^(A) 0,010	n.s. 0,854	n.s. 0,199 ^R	n.s. 0,543	*** ^(E) <0,001	*** ^(E) <0,001	*** ^(E) <0,001	n.s. 0,104	n.s. 0,396	n.s. 0,055 ^R	n.s. 0,891 ^R
2000 +CO ₂	n.s. 0,189	n.s. 0,240 ^R	* ^(E) 0,010	*** ^(E) <0,001 ^R	* ^(E) 0,037	n.s. 0,394	* ^(E) 0,036	*** ^(E) <0,001	* ^(E) 0,046	n.s. 0,352	* ^(E) 0,016	*** ^(E) <0,001

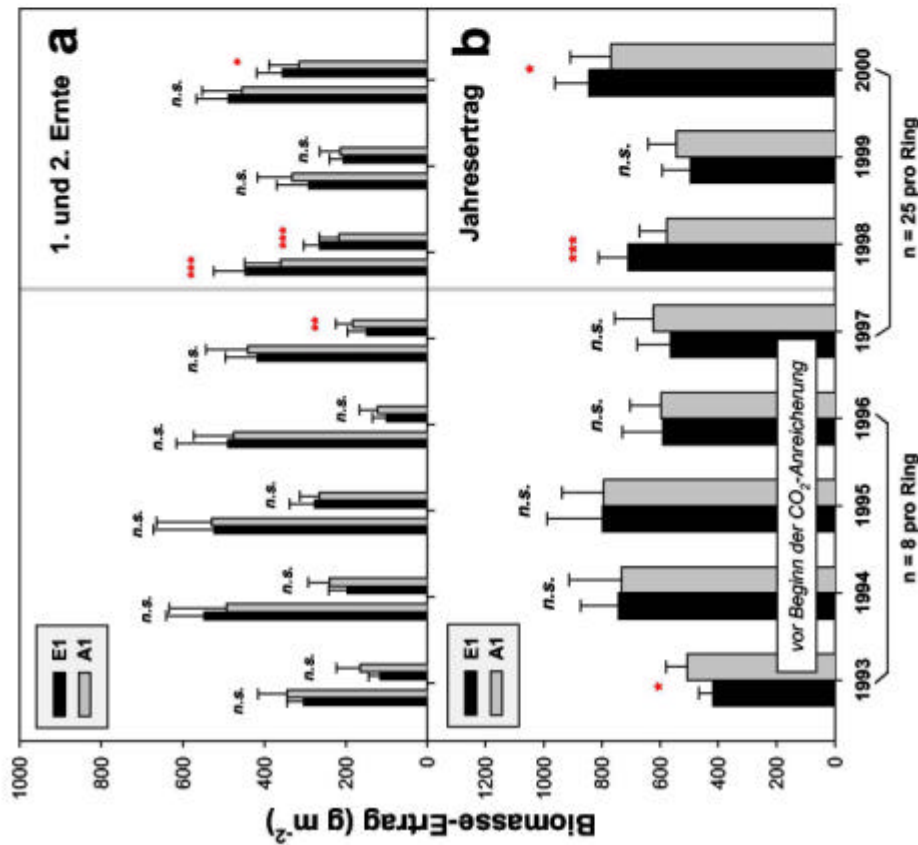
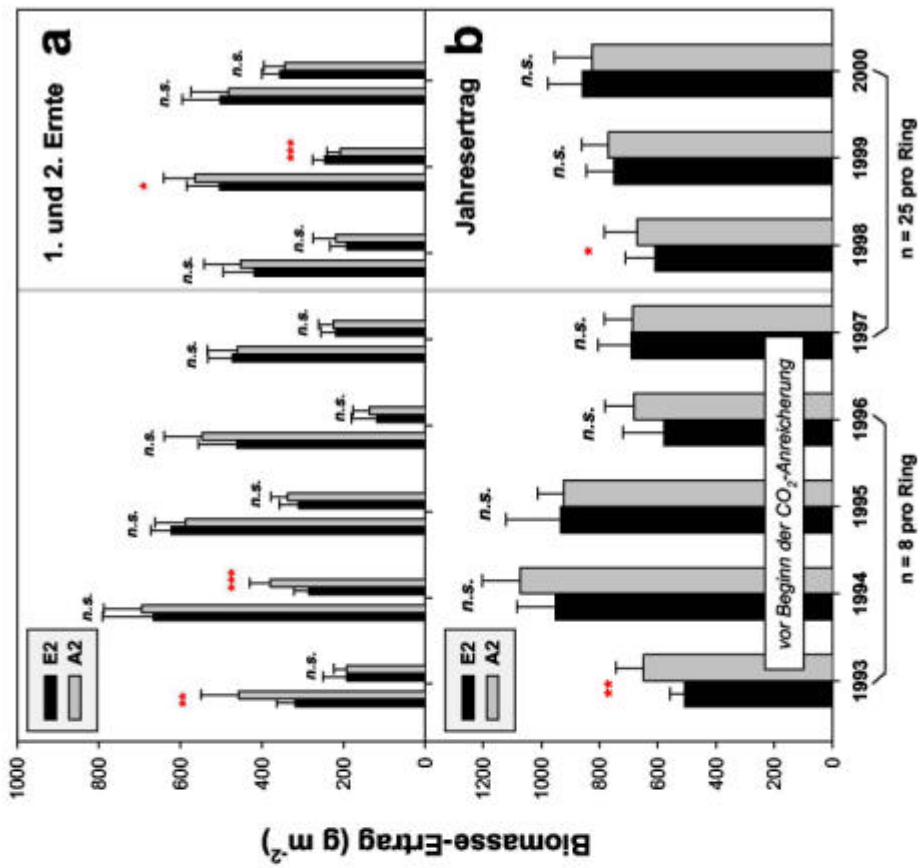


Abbildung 3.3-C: Ringpaar 1: Biomasse-Erträge mit Standardabweichung.

Abbildung 3.3-D: Ringpaar 2: Biomasse-Erträge mit Standardabweichung.

Beide Abbildungen: a) der Einzel-Ernten (Juni und September) und b) der Jahreserträge. (Signifikanzen wie in Abbildung 5.3-B; P-Werte: Tabelle 5.3.2-A.)

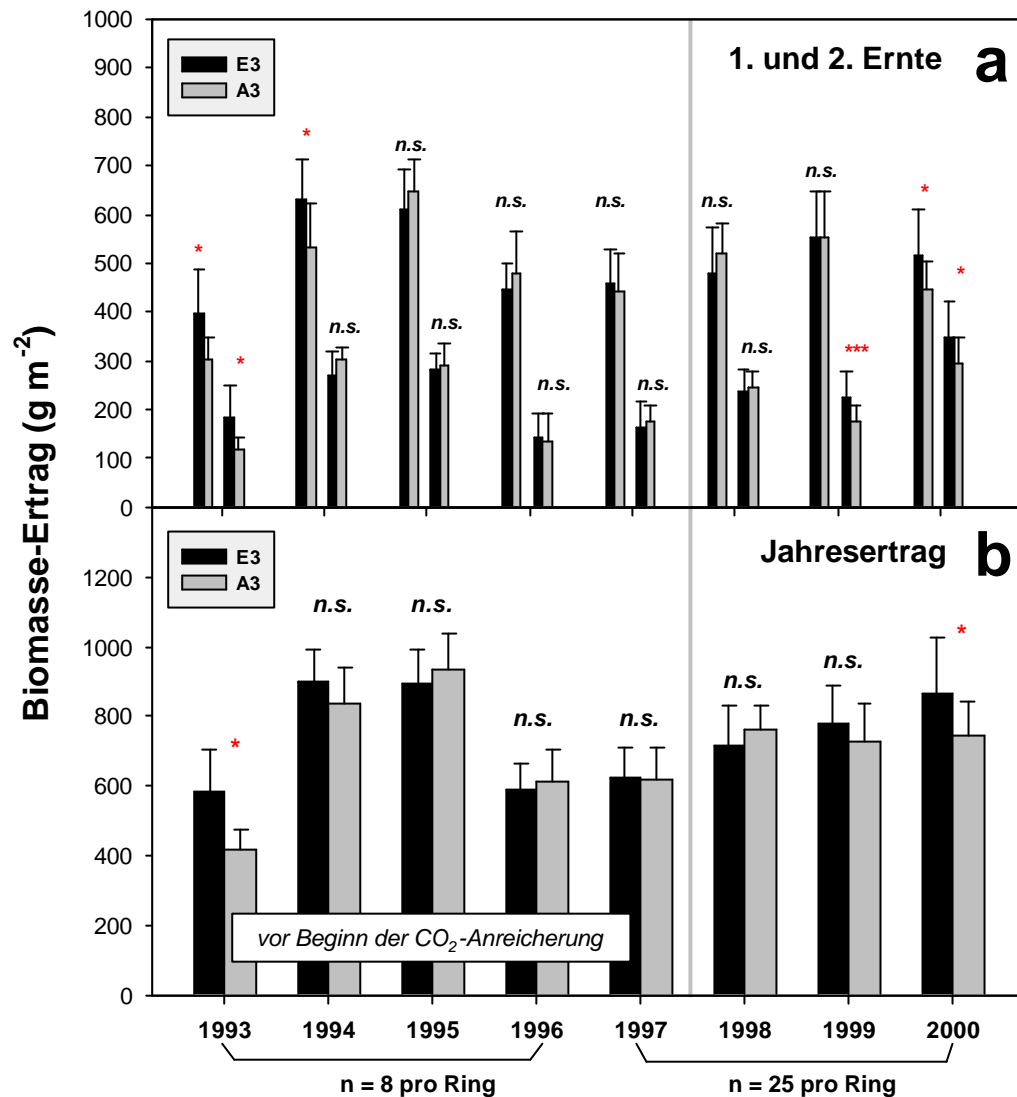


Abbildung 3.3-E: Ringpaar 3: Erträge und Standardabweichung der oberirdischen Biomasse **a)** der Einzel-Ernten (Juni und September) und **b)** der Jahreserträge. Signifikanzen wie Abb. 3.3-B (t-test, n = 8 bzw. n = 25 pro Ring). P-Werte: Tab. 3.3.2-A.

Die Gesamterträge wurden zusätzlich einer zweifaktoriellen Varianzanalyse unterzogen, wobei neben dem ersten Faktor "CO₂-Behandlung" die Lage des Ringpaars (d.h. die mittlere Bodenfeuchte) den zweiten Faktor darstellte (Tab. 3.3-B). Die bei "CO₂-Behandlung" ermittelten Signifikanzen entsprechen denen der t-tests, d.h. im September 1994 und 1997 war der A-Ertrag signifikant höher (ohne Interaktion mit der Lage). Die Lage hatte ebenfalls einen signifikanten Einfluß auf den Ertrag, wobei das feuchteste Ringpaar 2 häufig signifikant höhere Erträge aufwies als Ringpaar 3 oder 1. Bei der zweiten Ernte waren diese Unterschiede tendenziell ausgeprägter. Im Jahr 1996, in dem die Auswahl der Flächen für den Aufbau des FACE-Experiments vorgenommen wurde, waren keinerlei Signifikanzen vorhanden - weder zwischen den (zukünftigen) CO₂-Flächen, noch in der Lage oder gar der Interaktion (Tab. 3.3-B). Das Auftreten von Interaktionen spiegelt die inhomogenen Reaktionen der Ringpaare wider, wie sie schon mittels t-tests beschrieben wurden: Im Jahr 1993 ist bei E3 der Ertrag höher als bei A3,

zugleich ist es aber bei jeder Ernte bei einem anderen Ringpaar genau anders herum ($A > E$). Da hier die (noch nicht vorhandene) CO_2 -Reaktion scheinbar von der Lage abhängig war, ergab die Varianzanalyse eine signifikante Interaktion. In allen folgenden Jahren trat keine signifikante Interaktion mehr auf, bis zum Beginn der CO_2 -Anreicherung. Hier reagierten, wie bereits beschrieben, die verschiedenen Ringpaare uneinheitlich (stark), was zum Befund "signifikante Interaktion" führte.

Im Jahr 2000 schließlich gab es einen hoch- und höchstsignifikanten CO_2 -Effekt bei der ersten und zweiten Ernte, und keinerlei signifikante Lage-Unterschiede. Es existierte keine Interaktion, d.h. der signifikante CO_2 -Effekt war unabhängig vom Bodenfeuchtegradienten, stets war der Ertrag der E-Fläche höher als der der zugehörigen A-Fläche.

Tabelle 3.3-B: Zweifaktorielle Varianzanalysen (ANOVA) der Gesamt-Erträge aus der ersten, der zweiten und aus beiden Ernten (Summe) auf den zur CO_2 -Anreicherung ausgewählten Flächen E1 bis E3 und A1 bis A3. Erster Faktor: CO_2 -Anreicherung; Zweiter Faktor: Lage der Ringpaare 1 bis 3 (variierende Bodenfeuchte). "Interaktion signifikant": CO_2 -Ergebnis abhängig vom Einfluß der Bodenfeuchte (Bsp. Signifikanz bei nur einem Ringpaar).

Jahre 1993 bis 1996: $n = 8$ pro Fläche und Ernte; Ab 1997: $n = 25$ pro Ring und Ernte; Mai 1998: Beginn der CO_2 -Anreicherung.

* = signifikant (P: 0,05 – 0,01); ** = hochsignifikant (P: <0,01 – 0,001); *** = höchstsignifikant (P < 0,001). Bei Signifikanz ist angegeben, welche Flächen den höheren Ertrag aufweisen.

Jahr	CO ₂ -Applikation			Lage 1 – 3 (Bodenfeuchte)			Interaktion		
	Erste Ernte	Zweite Ernte	Summe Ernten	Erste Ernte	Zweite Ernte	Summe Ernten	Erste Ernte	Zweite Ernte	Summe Ernten
1993	n.s.	n.s.	n.s.	* 2 > 1	** 2 > 1	*** 2 > 1 2 > 3	*** A2 > E2 E3 > A3	*** A1 > E1 E3 > A3	*** A1 > E1 A2 > E2 E3 > A3
1994	n.s.	*** A > E	n.s.	*** 2 > 1 2 > 3	*** 2 > 1 2 > 3 3 > 1	*** 2 > 1 2 > 3 3 > 1	n.s.	n.s.	n.s.
1995	n.s.	n.s.	n.s.	* 3 > 1	** 2 > 1	** 2 > 1 3 > 1	n.s.	n.s.	n.s.
1996	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
1997	n.s.	* A > E	n.s.	n.s.	*** 2 > 1 2 > 3	*** 2 > 1 2 > 3	n.s.	n.s.	n.s.
1998 +CO ₂	n.s.	n.s.	n.s.	*** 3 > 1 3 > 2	*** 1 > 2 3 > 2	*** 3 > 1 3 > 2	*** E1 > A1	** E1 > A1 A2 > E2	*** E1 > A1 A2 > E2
1999 +CO ₂	* A > E	*** E > A	n.s.	*** 2 > 1 3 > 1	** 2 > 3	*** 2 > 1 3 > 1	n.s.	** E2 > A2 E3 > A3	* E3 > A3
2000 +CO ₂	** E > A	*** E > A	*** E > A	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

3.3.3 Erträge der funktionellen Hauptgruppen (Gräser, Kräuter, Leguminosen)

Den weitaus höchsten Anteil am Ertrag hatte generell die Gruppe der Gräser mit etwa 80 % (Abb. 3.3-F, c). Es folgte bei allen Flächen die Gruppe der Kräuter, während die der Leguminosen stets nur einen sehr geringen Anteil am Jahresertrag besaß. Der Leguminosen-Ertrag reichte von Einzel-Funden, d.h. weniger als 0,01 %, bis maximal 3,4 % (Ring A2, Ernte Juni 2000). Daher wird die Gruppe "Kräuter und Leguminosen" hier als "krautige Pflanzen" zusammengefaßt behandelt. Zusätzlich werden kurz die Erträge der N₂-fixierenden Leguminosen wegen ihrer generellen Bedeutung für den N-Eintrag in ein Ökosystem beschrieben.

Ein Trend ist beiden CO₂-Behandlungen (E und A) gemeinsam: Verglichen mit 1997 nahm der prozentuale Anteil der Gräser (bezogen auf den Ertrag der betreffenden Fläche) bis 2000 leicht ab, während der Ertrag der "krautigen Pflanzen" sowohl bei A als auch bei E prozentual leicht anstieg (Abb. 3.3-F und 3.3-G, jeweils c). Schon vor Beginn der CO₂-Anreicherung (1997) war der Gräser-Ertrag auf den E-Flächen im Mittel (nicht-signifikant) höher als auf den A-Flächen, während die A-Flächen einen höchstsignifikant größeren Kräuter-Ertrag aufwiesen (Abb. 3.3-F, 3.3-G). Mit der Fortdauer der CO₂-Erhöhung wuchs (Ausnahme: Juni-'99-Ernte) der Unterschied in der Gras-Biomasse zwischen den A- und E-Flächen ständig, bis bei den drei letzten Ernten die E-Gras-Erträge höchstsignifikant größer waren (Abb. 3.3-F, a; Tab. 3.3-C).

Bei der Gruppe der "krautigen Pflanzen" bestand im Mittel der umgekehrte Trend: Zu Beginn wiesen die A-Flächen stets den signifikant größeren Ertrag auf, ab September 1999 war der Unterschied jedoch nicht mehr signifikant (Abb. 3.3-G, a; Tab. 3.3-C). Im Kräuter-Jahresertrag spiegelte sich dies im schrittweisen Rückgang des Signifikanzniveaus wider, von "höchstsignifikant" im Jahr 1997 (A > E) hin zu "kein signifikanter Unterschied" im Jahr 2000 (Abb. 3.3-G, b). Von 1997 bis 2000 ging die Differenz in Kräuter-Ertrag zwischen den E- und den A-Flächen von etwa 6,9 % auf 3,1 % zurück (Abb. 3.3-G, c, Punkt-Linien-Darstellung). Prozentual als Anteil an der Erntebiomasse des betreffenden Rings/der Fläche dargestellt, veränderte sich der mittlere Kräuteranteil bei beiden CO₂-Behandlungen (E1-E3, A1-A3) nicht gravierend. So betrug das Massen-Verhältnis "Gräser-zu-Krautige" 1997 auf den E-Flächen 5,5:1 und auf den A-Flächen 3,6:1. In den Jahren 1998 und 1999 stieg dieses Verhältnis zugunsten der Gräser auf beiden Flächen an, während es 2000 auf Werte unterhalb des 1997er Ausgangswertes fiel: 4,2:1 in den E-Ringen und 3,1:1 in den A-Ringen.

Bei Betrachtung der einzelnen Ringe (Abb. siehe Anhang) wiesen einige durchaus klare Trends auf, die durch die Mittelwert-Bildung über die drei Flächen "verschwinden": Der prozentuale Anteil der Kräuter-Biomasse hatte sich von 1997 bis 2000 auf der E1- und der A1-Fläche in etwa verdoppelt; entsprechend war der Gräser-Anteil rückläufig. Der Rückgang in der Gruppe der Gräser zugunsten der "Krautigen" schien auf der A1-Fläche rascher zu verlaufen als auf der E1-Fläche (Abb. A-3.3-J und A-3.3-K, Anhang). Als subjektive Beobachtung soll hier ergänzt werden, daß der Anteil von *Geranium pratense* auf A1 relativ groß war. Die rasche Ausbreitung dieser ertragreichen krautigen Pflanze könnte die Ursache des A1-Trends sein.

Bei den beiden Ringen E2 und A2 war kein klarer Trend bezüglich des Gräser- und Kräuteranteils auszumachen. Generell war auch hier der Kräuteranteil ab 1997 auf der A-Fläche größer als auf der E-Fläche, und hier blieb er es auch (Abb. A-3.3-L, A-3.3-M). Bei Ringpaar 3 stieg im Ring E3 (wie im E1) die prozentuale Kräuterbiomasse kontinuierlich an (auf mehr als das Doppelte des Werts von 1997), während sie auf A3 in etwa gleich blieb. Auf diese Weise verringerte sich die Differenz zwischen A3 und E3 ständig, von eingangs höchstsignifikant größeren A-Erträgen auf nicht-signifikant höhere E-Erträge (Abb. A-3.3-O). Obwohl die Gras-Biomasse auf E3 prozentual abnahm, war sie absolut gesehen seit September 1999 (mindestens) hochsignifikant größer als auf A3 (Abb. A-3.3-N).

Bei Analyse der Ringpaare bezüglich des Anteils funktioneller Gruppen existiert somit kein klarer Trend in den drei Ringpaaren. In zwei von drei E-Ringen (den trockeneren der drei Flächen) stieg die Kräuterbiomasse im Verhältnis zur Gräser-Biomasse rasch an: Mittelt man nur die Verhältnisse der Ringpaare 1 und 3, so sank das Gräser-zu-Krautige-Verhältnis der E-Flächen von 1997 bis 2000 wie folgt: 12:1 (1997), 7,9:1 (1998), 6,2:1 (1999) und 4,2:1 (2000). Das Verhältnis der zugehörigen A-Flächen (1 und 3) sank auch, aber weniger rasch und betrug für diese Jahre: 5,9:1 (1997), 5,6:1 (1998), 5,6:1 (1999) und 3,5:1 (2000).

Tabelle 3.3-C: Jahreserträge: Zweifaktorielle Varianzanalyse auf den zur CO₂-Anreicherung ausgewählten Flächen. Erster Faktor: CO₂-Applikation; Zweiter Faktor: Lage der Ringpaare 1 bis 3 (variierende Bodenfeuchte). "Interaktion signifikant": CO₂-Ergebnis abhängig vom Einfluß der Bodenfeuchte (Bsp. Signifikanz nur bei einem Ringpaar).

n = 25 pro Ring und Ernte; Mai 1998: Beginn der CO₂-Anreicherung * = signifikant (P: 0,05 – 0,01); ** = hochsignifikant (P: <0,01 – 0,001); *** = höchstsignifikant (P < 0,001) Bei Signifikanz ist angegeben, welche Flächen den höheren Ertrag aufweisen.

Gesamt	CO ₂ -Applikation			Lage 1 – 3 (Bodenfeuchte)			Interaktion		
	Jahr	Gesamt-Ertrag	Gräser	Kräuter & Legu.	Gesamt-Ertrag	Gräser	Kräuter & Legu.	Gesamt-Ertrag	Gräser
1997	n.s. 0,362	n.s. 0,102	*** <0,001 A > E	*** <0,001 2 > 1 2 > 3	** 0,003 1 > 2 3 > 2	*** <0,001 2 > 1 2 > 3	n.s. 0,178	* 0,023 E3 > A3	n.s. 0,058
1998 +CO ₂	n.s. 0,630	** 0,006 E > A	*** <0,001 A > E	*** <0,001 3 > 2 3 > 1	*** <0,001 3 > 2 3 > 1 1 > 2	*** <0,001 2 > 1 2 > 3	*** <0,001 E1 > A1 A2 > E2	** 0,004 E1 > A1	*** <0,001 A2 > E2 A3 > E3
1999 +CO ₂	n.s. 0,835	n.s. 0,447	n.s. 0,067	*** <0,001 2 > 1 3 > 1	*** <0,001 2 > 1 3 > 1	n.s. 0,209	* 0,029 E3 > A3	n.s. 192	n.s. 0,332
2000 +CO ₂	*** <0,001 E > A	*** <0,001 E > A	n.s. 0,099	n.s. 0,261	n.s. 0,098	* 0,015 1 > 3 2 > 3	n.s. 0,232	n.s. 0,699	n.s. 0,070

3.3.4 Erträge der Leguminosen

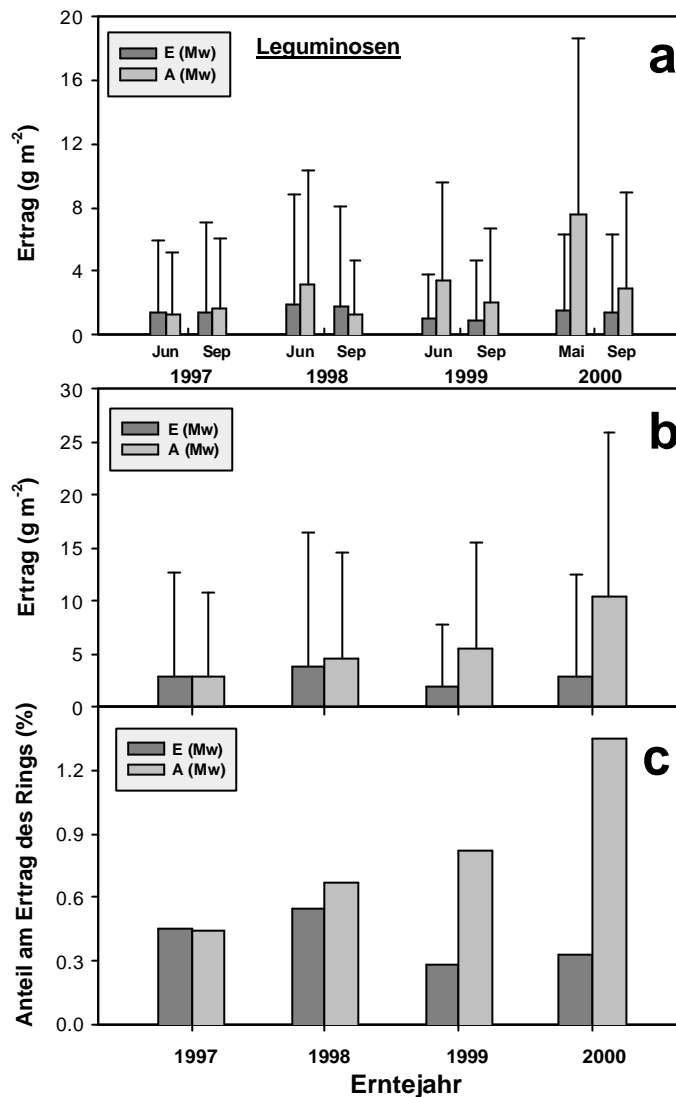


Abbildung 3.3-H: Mittlerer Leguminosen-Ertrag auf den E- und den A-Flächen **a)** Einzel-Erträge (Juni und September), **b)** Jahres-Erträge und **c)** Prozentuale Anteile an der E- bzw. A-Gesamt-Biomasse.

Der Anteil der Leguminosen war im Mittel auf den A-Flächen höher als auf den E-Flächen. Während 1997 im Mittel noch annähernd gleiche (geringe) Erträge auf den E- und A-Flächen erzielt wurden, blieb der Anteil auf den E-Flächen gleich bzw. war leicht rückläufig, während er auf den A-Flächen rasch zunahm (Abb. 3.3-H). So stieg von 1997 bis 2000 der prozentuale Anteil am A-Flächen-Ertrag um das dreifache, während er auf den E-Flächen leicht sank. Die einzelnen Ringe unterschieden sich stark im Leguminosenanteil: Auf E1 und A1 war er generell sehr gering (E1 > A1, Abb. A-3.3-P, -Q). Auf E2 gab es nur Einzelfunde, während der Leguminosenanteil auf A2 höher war als in allen anderen Ringen (Abb. A-3.3-R). Bei Ringpaar 3 war er 1997 auf E3 etwas größer, 2000 dagegen auf A3 deutlich höher (Abb. A-3.3-S). Die Werte dazwischen schwankten allerdings; es bestand kein klarer Trend. Es war vor allem die Zunahme der Leguminosen-Masse in Ring A2, die für den geschilderten mittleren Zuwachs des Leguminosenanteils der Kontrollbehandlung verantwortlich war.

3.3.5 Ertrags-Unterschiede innerhalb der einzelnen Ringflächen

Damit die Spurengasmessungen in den CO₂-Ringen als repräsentativ für den betreffenden Ring betrachtet werden können, mußte sichergestellt werden, daß der Ertrag der drei Meßstellen (Bodenrahmen) nicht generell höher oder generell niedriger war als auf der Gesamt-Ringfläche. Ebenso wurde getestet, ob die Nord- und die Südhälfte innerhalb eines Rings im Ertrag stark voneinander abwichen (Bodenfeuchtegradient) und ob eventuelle Unterschiede durch die Jahre hindurch kontinuierlich auftraten.

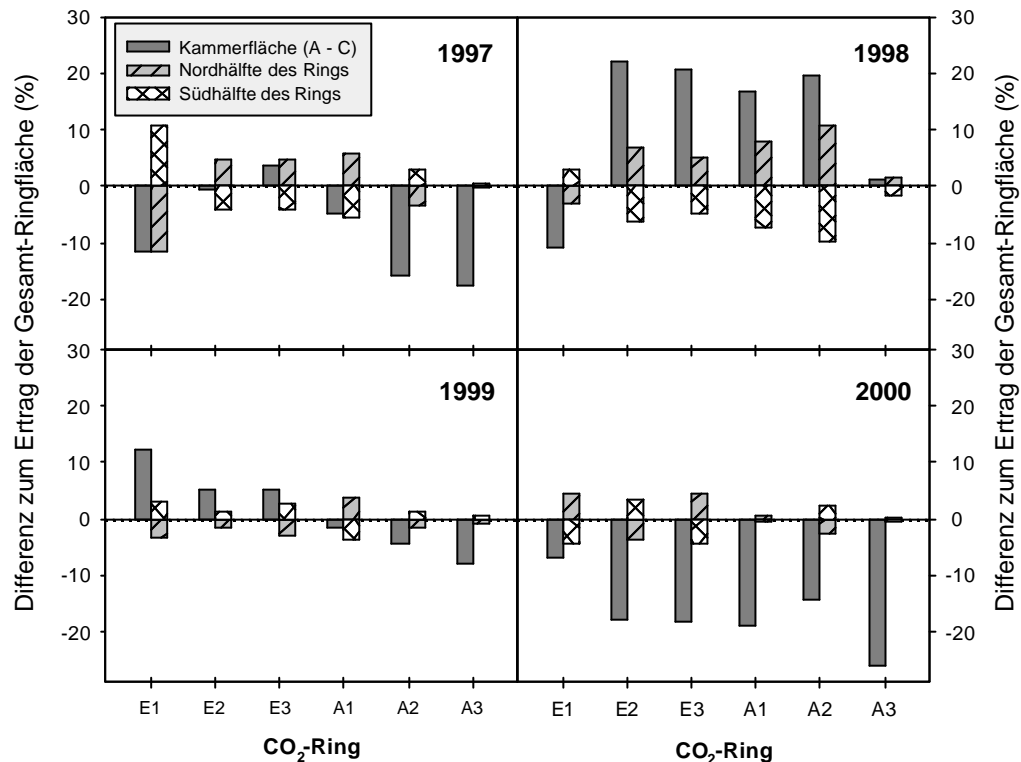


Abbildung 3.3-I: Prozentuale Abweichung der Erträge der Nord- und Südhälfte, sowie der Kammer-Grundfläche (= Bodenringe A bis C), von der Gesamt-Fläche der Ringe in den Jahren 1997 bis 2000.

Wie aus Abbildung 3.3-I hervorgeht, existierte kein eindeutiger Trend bezüglich der Ertragsunterschiede zwischen der Süd- und der Nordhälfte der einzelnen Ringe. In jedem Ring wies mal die eine, mal die andere Hälfte den größeren Ertrag auf.

Da die n-Zahl (3) der Bodenrahmen-Flächen viel kleiner war als die einer Ringhälfte (12 bzw. 13), war die prozentuale Abweichung vom Gesamt-Ertragswert häufig größer. Der Ertrag der Kammer-Flächen war bei keinem der sechs CO₂-Ringe jedes Jahr beständig höher oder beständig niedriger als der Gesamtertrag. Vielmehr variierten sowohl das Ausmaß als auch das Vorzeichen der Abweichung von Jahr zu Jahr. Somit können die Flächen zur Spurengas-Messung aus der Ertragsperspektive als repräsentativ für die gesamte Ringfläche angesehen werden.

3.4 Entwicklung des Blattflächenindex (LAI) unter erhöhtem CO₂

3.4.1 Allgemeine Beobachtungen bei der LAI-Messung

Kurz vor den Ernten begann der Gräser-dominierte Bestand häufig "umzukippen", d.h. die Halme der Gräser knickten in Bodennähe ein. Nach ein bis zwei Wochen konnte ein liegender, besonders dichter Bestand in Bodennähe bereits zu faulen beginnen; um dies zu vermeiden, war beispielsweise die erste Ernte 2000 vorgezogen worden. Abb. 3.4-A zeigt das Niederlegen des Bestandes kurz vor der Juni-Ernte in Form eines scheinbaren LAI-Rückgangs. Das Niederlegen trat in allen Ringen um einen LAI von 7 auf (Ringpaare 1, 2 und 3 im Juni 1998, Ringpaare 2 und 3 im Juni 1999). blieb der LAI unterhalb von 6, erfolgte kein Niederlegen des Bestandes (Bsp. Ringpaar 1, Juni 1999). Der scheinbare LAI-Rückgang war umso ausgeprägter, je größer der zuvor ("stehend") erreichte LAI-Wert war (Bsp. Ringpaare 2, 3; Frühjahr 1998).

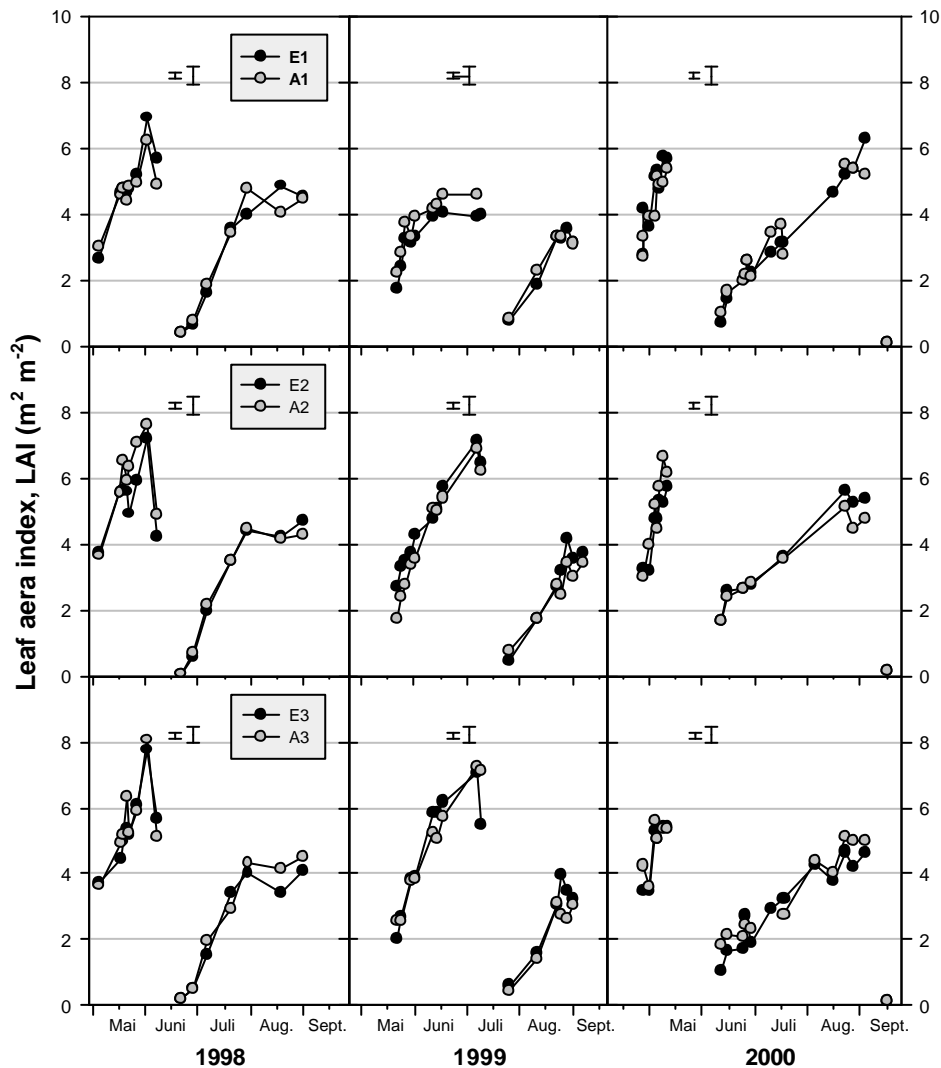


Abbildung 3.4-A: Entwicklung des Blattflächenindex (LAI) in den einzelnen Ringen seit Beginn der CO₂-Anreicherung. Fehlerbalken: gemittelt Minimum und Maximum des 1998-er Standardfehlers (gemittelte, vom Meßgerät errechnete Standardfehler aller abgebildeten Datenpunkte von 1998, vgl. 2.9).

Bei der Spätsommer-Ernte war nie ein Niederlegen des Bestandes zu beobachten. Statt dessen rollten sich unter besonders trockenen Bedingungen die Spreiten einiger Gräser zum Schutz gegen H_2O -Verluste ein (z.B. *Festuca rubra*). Leichte Rückgänge bzw. Stagnation der LAI-Werte vor der September-Ernte sind hierauf zurückzuführen.

3.4.2 LAI-Entwicklung auf den einzelnen CO_2 -Flächen

Die LAI-Entwicklung wurde stärker vom Feuchtegradienten als von der CO_2 -Behandlung beeinflusst – die Unterschiede zwischen den Ringpaaren sind größer und die Verläufe deutlicher voneinander verschieden als die der E- und A-Behandlungen innerhalb einer Lage auf dem Versuchsfeld. Die Unterschiede in der Biomasse zwischen den E- und A-Flächen spiegeln sich teilweise, aber nicht immer, im kurz vor der Ernte erreichten LAI-Wert wieder. So war beim ersten Ringpaar der LAI-Wert immer bei dem Ring (E oder A) höher, der auch den größeren Biomasse-Ertrag aufwies. Bei den Ringpaaren 2 und 3 hingegen stimmten LAI-Abstand und Ertragsunterschied in nur etwa 50 % der Fälle überein (vgl. Abb. 3.3-C bis -E mit Abb. 3.4-A).

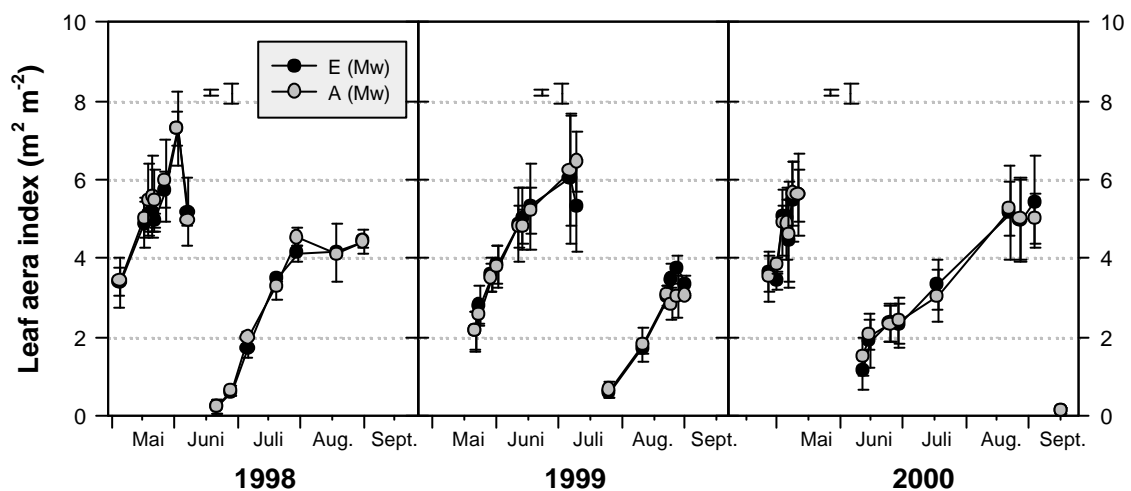


Abbildung 3.4-B: Mittlere Blattfläche der E und A-Flächen von 1998 bis 2000. Jeder Datenpunkt: Mittelwert \pm Standardabweichung der drei Flächen E1 bis E3 bzw. A1 bis A3. Abgebildete Fehlerbalken: Mittlerer minimaler und maximaler Standardfehler einer Einzelmessung (Wert eines Rings: i.d.R. sechs Einzelmessungen).

Gemittelt über die drei Flächen einer CO_2 -Behandlung (Abb. 3.4-B) ist so gut wie kein Unterschied in der LAI-Entwicklung zwischen den Behandlungen sichtbar. Lediglich im August – September der Jahre 1999 und 2000 war der LAI auf den CO_2 -angereicherten Flächen etwas höher. Der Unterschied ist jedoch sehr gering und liegt im Bereich des Standardfehlers einer Messung (Abb. 3.4-B).

3.4.3 Der Bezug zwischen Biomasse-Ertrag und LAI-Wert

Die Höhe des oberirdischen Biomasse-Ertrags korrelierte durchaus mit der Höhe des zugehörigen LAI-Werts (Abb. 3.4-C). Die beste Korrelation erreichte Ringpaar 3 mit einem R^2 von 0,8. Die Größenordnung der Beziehung (LAI pro g Trockengewicht) lag bei allen drei Ringpaaren in einer vergleichbaren Größenordnung (Abb. 3.4-C, a-c, Gradengleichungen). Es besteht kein signifikanter Unterschied in der Steigung der Korrelationsgeraden der E- und der A-Werte (Abb. 3.4-C, d). Dies zeigt, zumindest vor dem Hintergrund der dreijährigen Datengrundlage, daß die Jahr-zu-Jahr-Variationen größer sind als ein (möglicher) CO_2 -Effekt.

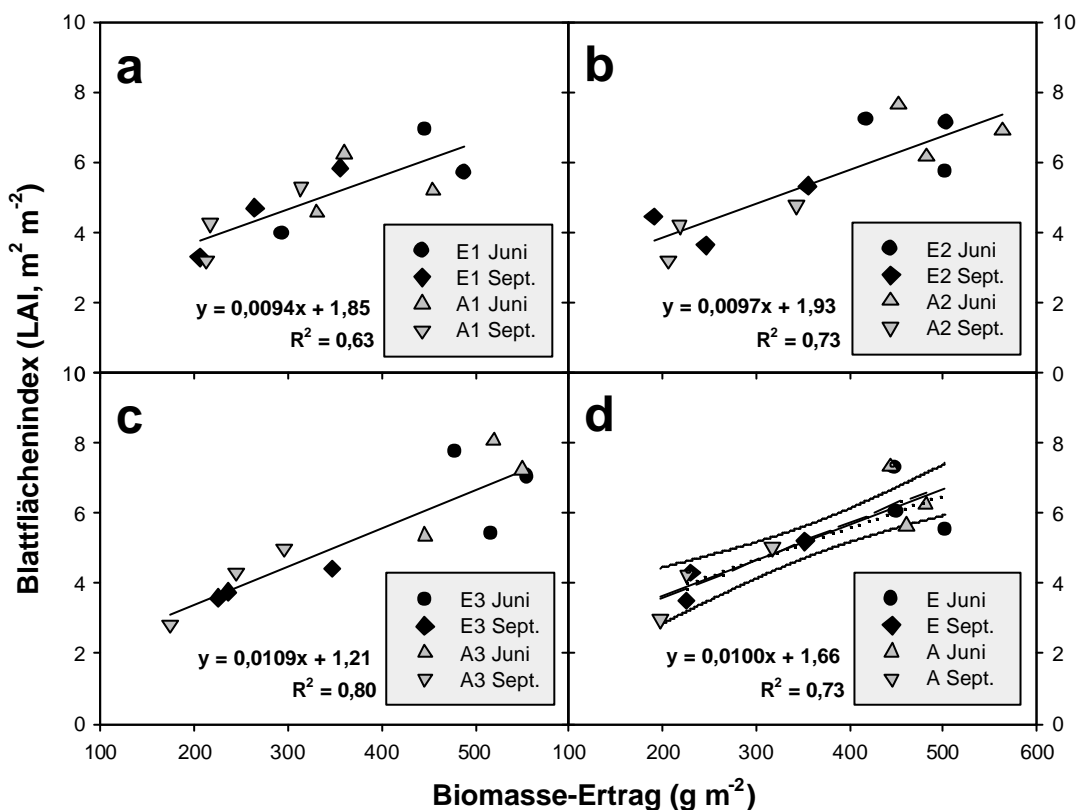


Abbildung 3.4-C: Korrelation zwischen Biomasse-Ertrag und Blattflächenindex. **a)** Ringpaar 1, **b)** Ringpaar 2, **c)** Ringpaar 3, **d)** Mittelwerte der E- und A-Flächen. Die eingezeichneten Korrelationsgeraden (durchgezogene Linien) beziehen sich auf alle jeweils abgebildete Daten. In **d)**: Gepunktete Linie: Korrelationsgerade der E-Werte, gestrichelte Linie: Korrelationsgerade der A-Werte, durchgezogene Linien: Korrelationsgerade aller Werte sowie zugehörige 95 %-Konfidenzintervalle.

Das Blattflächengewicht ("Hartlaubigkeit", bezogen auf die Grundfläche des Bestandes) wurde aus den erhobenen Daten für die Erntezeitpunkte berechnet, indem der Biomasse-Ertrag (in $g\ m^{-2}$) durch den LAI ($m\ m^{-2}$) kurz vor der Ernte dividiert wurde. Wenn der Bestand sich niedergelegt hatte, wurde der letzte "intakte" LAI-Wert davor verwendet (vgl. Abb. 3.4-A).

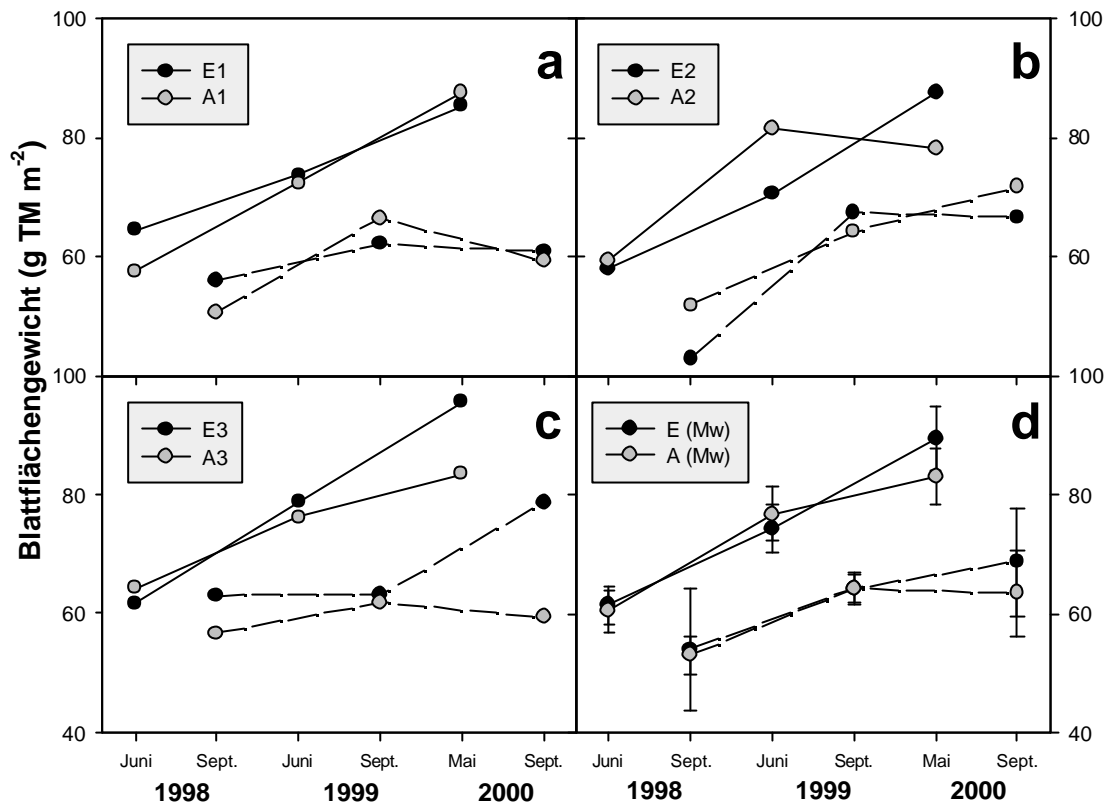


Abbildung 3.4-D: Entwicklung des Blattflächengewichts-Verhältnisses (*leaf weight ratio*, LWR) auf den unterschiedlichen CO₂-Flächen. **a)** Ringpaar 1; **b)** Ringpaar 2; **c)** Ringpaar 3; **d)** Mittelwerte des LWR der E- und A-Flächen, mit Standardabweichung E1 – E3 und A1 – A3.

Generell nahm das Blattflächengewicht (*leaf area weight*, LWR) auf allen Flächen von 1998 bis 2000 deutlich zu (Abb. 3.4-D). Bei der Frühsommerernte war es stets höher als bei der Spätsommerernte des betreffenden Jahres. Gemittelt über alle Flächen, stieg es von 60,9 (erste Ernte) bzw. 53,5 (zweite Ernte) im Jahr 1998 auf 86,3 bzw. 66,1 im Jahr 2000.

Während die Flächen E1 und A1 eine sehr ähnliche Entwicklung des LWR zeigen, steigt das LWR in den Frühjahrsernten auf der E2- und E3-Fläche stärker an als auf der jeweils zugehörigen A-Fläche. Gemittelt über alle E- und A-Flächen betrachtet (Abb. 3.4-D, d), ist das LWR 1998 und 1999 in etwa identisch (beide Ernten). Im Jahr 2000 dagegen stieg es auf den E-Flächen stärker an als auf den A-Flächen, auf denen sich der Anstieg verlangsamt (beide Ernten). Wie die Standardabweichung zeigt, ist der Unterschied jedoch nicht signifikant.

3.5 Bestandesatmung in den FACE-Ringen

3.5.1 Jahreszeitlicher Verlauf der Bestandesatmung

Nachdem die Messung der Spurengasflüsse im Herbst 1998 mehrfach im Dunkeln stattgefunden hatte, fiel bei der Datenauswertung (N_2O , CH_4) auf, daß die CO_2 -Konzentrationen unter den Hauben in den CO_2 -Ringen fast immer höher waren als die in den Kontrollringen. Daher wurde seitdem weitgehend nachts gemessen, um die CO_2 -Daten ebenfalls zur Flußberechnung (Bestandesatmung = Bodenatmung und Atmung der oberirdischen Biomasse) verwenden zu können. Bei einer einzelnen messenden Person dauerte eine Messung etwa 3,5 bis 4,5 h; konnte erst um 20:00 oder 21:00 Uhr mit Beginn der Dämmerung begonnen werden, dauerte die Messung bis weit nach Mitternacht. Daher ist die Datendichte (v.a. im Sommer 1999) geringer als im Winter.

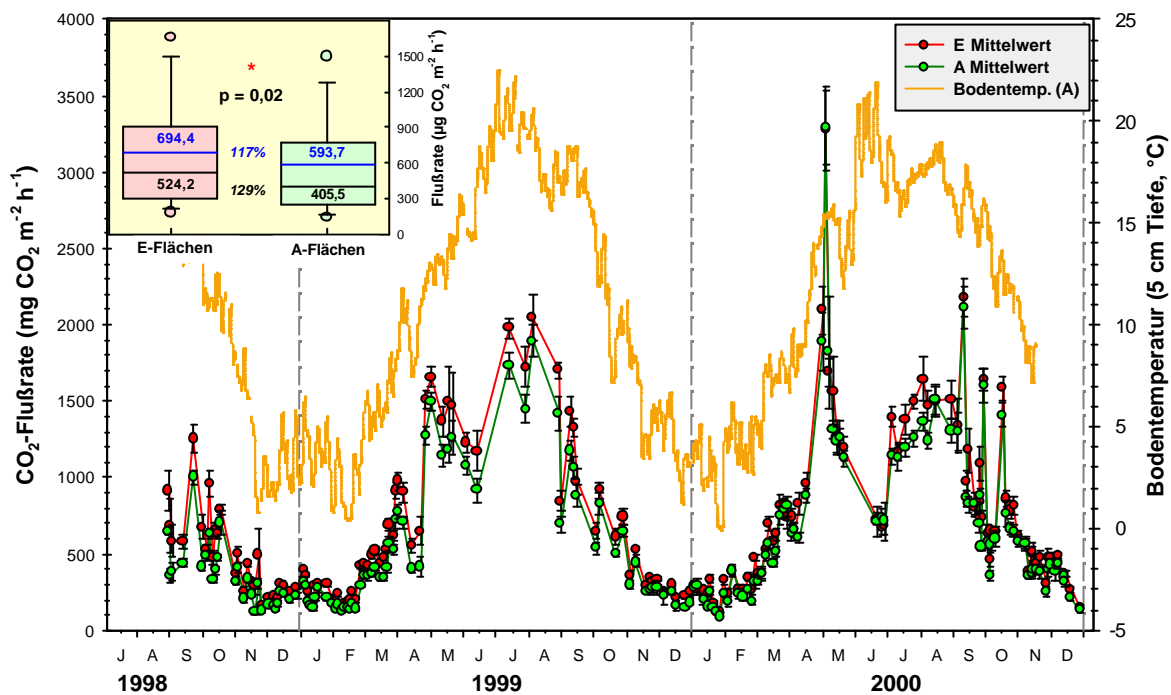


Abbildung 3.5-A: Jahreszeitlicher Verlauf der Bestandesatmung der gemittelten E und der A-Flächen; Fehlerbalken: Standardfehler, $n = 9$ Kammern pro Messung. Parallel als orange Linie: Verlauf der Bodentemperatur der A-Flächen in 5 cm Tiefe (rechte Ordinate).

Kleiner Boxplot links oben: Streubreite der E- und A-Werte über die gesamte Meßperiode; Punkte: 5- und 96%-Perzentile; schwarze Werte/Linien: Mediane; blaue Zahlen und Linien: Mittelwerte; Prozentwerte: E-Wert in Prozent des A-Werts. p-Wert: Man-Whitney-Test der beiden Datensätze.

Der Verlauf der Bodenatmungsraten folgte sehr eng dem der Bodentemperaturkurve (Abb. 3.5-A). Am auffälligsten ist dies außerhalb der Vegetationsperiode (auch wegen der höheren Datendichte). So stieg beispielsweise die Bodenatmung im März 1999 mit der steigenden Bodentemperatur an, und ging Mitte April mit der sinkenden Temperatur vorübergehend wieder zurück. Der folgende steile Anstieg Ende April/Anfang Mai 1999 war sowohl der Düngung als auch dem erneuten Temperaturanstieg und natürlich der raschen Zunahme der oberirdischen grünen Biomasse zuzuschreiben. Danach aber

sank die Bestandesatmungsrate, trotz steigender Bodentemperaturen und, bis zur Ernte am 14./15. Juni, trotz zunehmender oberirdischer grüner Biomasse. Die Ursachen sind wahrscheinlich das Abklingen des Düngereffekts sowie der Rückgang der Bodenfeuchte (vgl. 3.1.2).

Am Abend des 11. September 2000 nach Abernten der oberirdischen Biomasse wurden "Peak"-Werte gemessen, die bei beiden CO₂-Behandlungen fast gleich hoch waren (Abb. 3.5-A). Der Peak fiel nicht mit dem Bodentemperatur-Maximum zusammen; dieses wurde erst einige Tage später erreicht (unbedeckter Boden). Zudem unterschieden sich die Bodenfeuchtwerte des Erntetages nur um 0,5 bis 1 Vol.-% von denen der Meßtage davor und danach. Zweimal wurde auch am Abend der ersten Ernte gemessen: 1999 (15. Juni) und 2000 (22. Mai). Hier traten keine Peakwerte auf, die sich deutlich von den Messungen vor und nach der Ernte unterschieden hätten – die Atmungsraten blieben (bei etwa gleicher Bodentemperatur) in der gleichen Größenordnung wie an den Tagen vor der Ernte. Zu erwarten gewesen wäre aber, daß die Atmungsraten nach Entfernen der oberirdischen Biomasse sinken. Bei der zweiten Ernte 1999 wurde am Abend des Erntetages keine Messung vorgenommen. Der Peakwert am 5. Mai 2000 läßt sich auf keine erkennbare Ursache zurückführen. Sie wurden in einigen der folgenden Graphiken weggelassen; dies ist jeweils vermerkt.

3.5.2 Der Einfluß des erhöhten CO₂ auf die Bestandesatmung

Über die gesamte Bestandesatmungs-Meßperiode (September 1998 bis Dezember 2000) war die Atmung in jedem der drei E-Ringe höher als in seinem zugehörigen A-Partner (Abb. 3.5-B). Der Unterschied war für das erste Ringpaar hochsignifikant, für das zweite signifikant und für das dritte nicht signifikant, was über die CO₂-Behandlungen gemittelt einen signifikanten Unterschied bedeutete (vgl. auch Abb. 3.5-A).

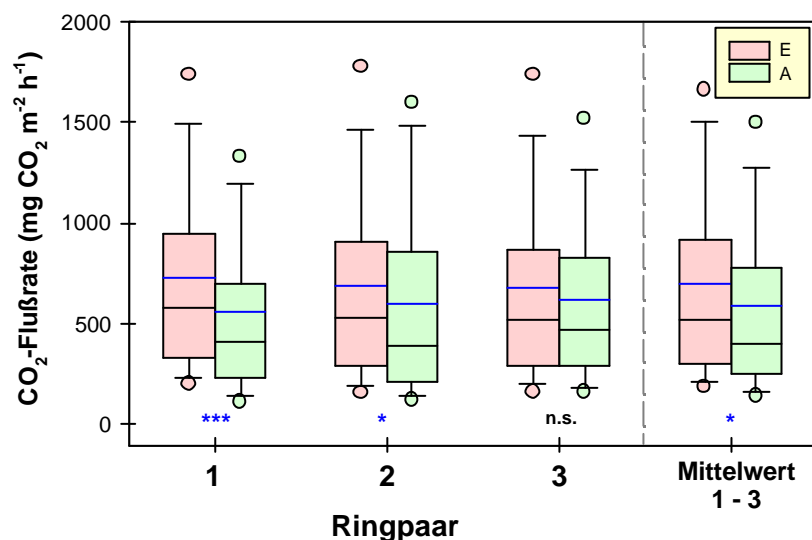


Abbildung 3.5-B: Boxplots aller CO₂-Flußraten (Bestandesatmung) der sechs CO₂-Ringe von September 1998 bis Dezember 2000. Schwarze Linie: Median, blaue Linie: Mittelwert. Punkte: 5 und 95%-Perzentile. Man-Whitney-Test E1, A1: p < 0,001; E2, A2: p = 0,017; E3, A3: p = 0,499

Der Unterschied zwischen den CO₂-Behandlungen bestand aber nicht gleichförmig über die gesamte Zeitperiode: Wie Abb. 3.5-C (a, b) sowie Tab. 3.5-A zeigen, war er über die gesamte Meßperiode, September 1998 bis Dezember 2000, rückläufig. Der Unterschied zwischen den beiden CO₂-Behandlungen scheint in der Winterphase stets etwas ausgeprägter gewesen zu sein als während der Sommermonate (Abb. 3.5-C, a; Tab. 3.5-A); die untere Abbildung **b** zeigt dies nicht aufgrund der hohen Sommerraten, die eine größere prozentuale Differenz zwischen den Behandlungen vortäuschen als sie wirklich bestand. Wie die Trendlinien in Abb. 3.5-C, a sowie die immer seltener auftretende Signifikanz in **b** jedoch zeigen, nahm die Differenz zwischen den beiden Behandlungen immer stärker ab (vgl. p-Werte in Tab. 3.5-A).

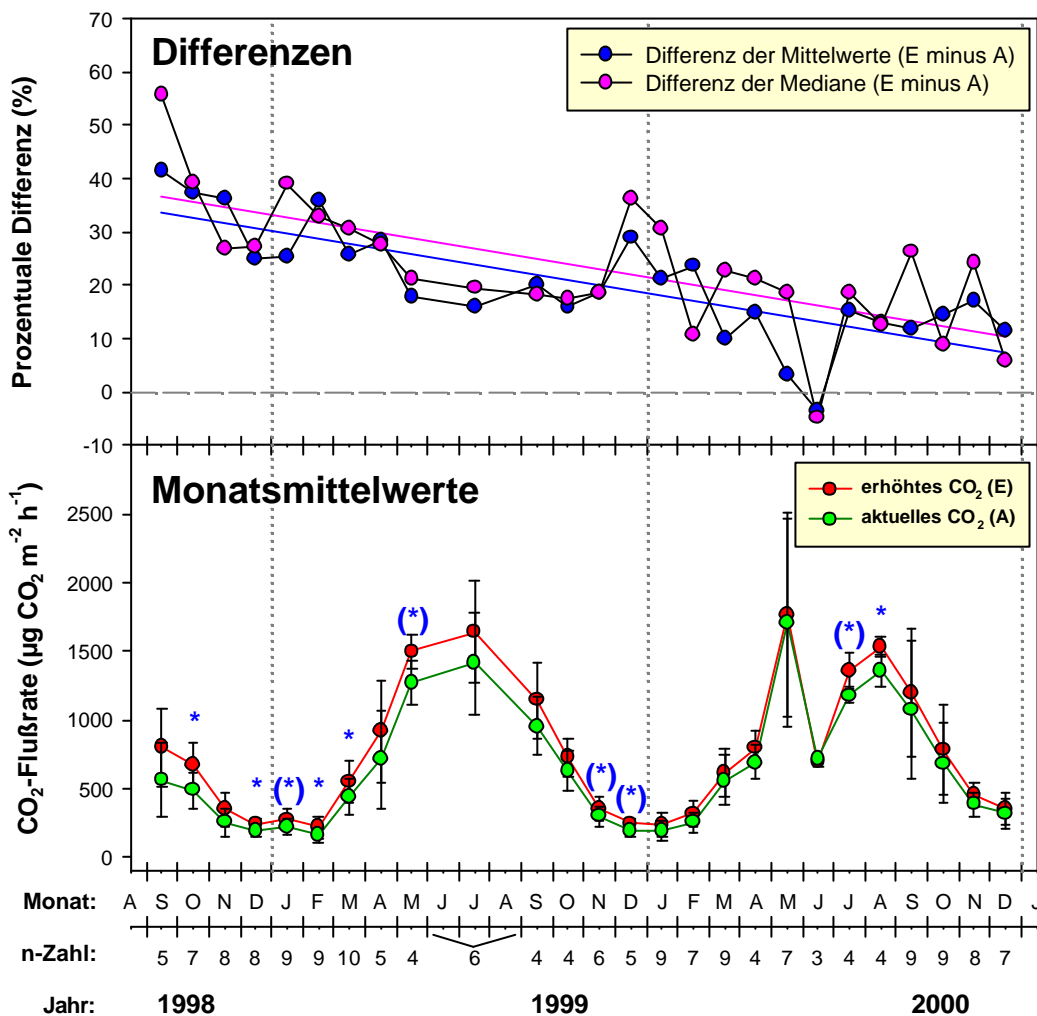


Abbildung 3.5-C: Unterschiede in der Bestandesatmung der E- und A-Flächen (jeweils Mittelwerte der Ringe 1 bis 3, wie in Abb. 3.5-A dargestellt).

Untere Graphik: Standardabweichung: zeitliche Streuung der E- bzw. A-Mittelwerte des Monats. Blauer Stern: signifikanter Unterschied zwischen E- und A-Mittelwert (T-Test bzw. Man-Whitney-Test), Stern in Klammern: 0,05 < p-Wert < 0,1.

Obere Graphik: Prozentuale Differenz zwischen E und A-Monatsmittelwert bzw. -medianwert, in Prozent des jeweiligen A-Werts. Trendlinien: lineare Regressionen der Mittel- und Median-Werte.

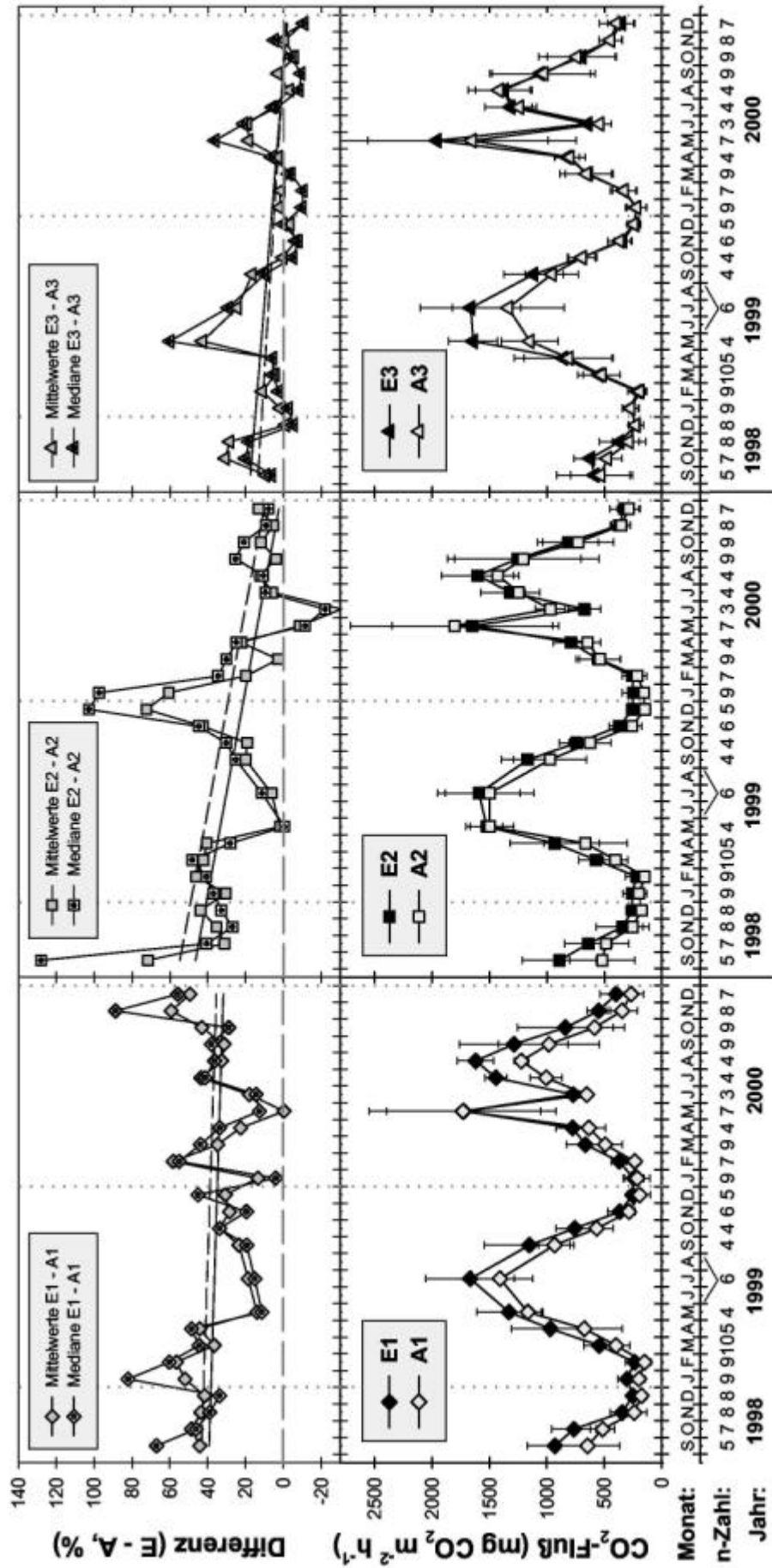


Abbildung 5.5-D: Unterschiede in der Bestandesatmung auf den drei Ringpaar-Flächen E1, A1 (links), E2, A2 (mitte) und E3, A3 (rechts) im Meßzeitraum 1998 bis 2000.

Untere Graphik-Reihe: Monatsmittelwerte mit Standardabweichung (wie Abbildung 5.5-C).

Obere Graphik-Reihe: Prozentuale Differenz zwischen einem E- und A-Monatsmittelwert bzw. -medianwert, in Prozent des jeweiligen A-Werts. Trendlinien: lineare Regressionen der Mittelwerte (durchgezogene Linie) und Medianwerte (gestrichelte Linie).

Der Abnahme-Trend des Unterschieds zwischen E und A bestand in jedem der drei Ringpaare (Abb. 3.5-C, c bis h; Tab. 3.5-B). Die E-Ringe der Ringpaare 1 und 2 wiesen zu Beginn der Messungen im Herbst/Winter 1998 etwa 40 % höhere Werte auf als ihre A-Partner, während der Unterschied zwischen E3 und A3 von Anfang an geringer war. In den zwei Vegetationsruhe-Perioden 1999/2000 sowie November-Dezember 2000 bestand im Prinzip kein Unterschied mehr zwischen E3- und A3-Bestandesatmung (Abb. 3.5-C, g). Während E2 gegen Ende der Untersuchungsperiode nur noch wenig höher als A2 war (Abb. 3.5-C, e), war die Differenz zwischen E1 und A1 nach wie vor hoch; die Abnahme-Tendenz war hier weniger stark ausgeprägt (Trendlinien, Abb. 3.5-C, c). Interessant sind auch die saisonalen Variationen der Differenzen: Während bei den Ringpaaren 1 und 2 die größten Differenzen im Winter (Vegetationsruhe) auftraten, lagen diese bei Ringpaar 3 im Frühsommer (Mai/Juni).

Tabelle 3.5-A: CO₂-Bestandesatmung (mg CO₂ m⁻² h⁻¹) der gemittelten E- und A-Flächen während verschiedener Meßperioden (ab der zweiten Ernte bis zur Düngung im Folgejahr; ab der Düngung bis zur zweite Ernte). **Fett:** Mittelwert; *Kursiv:* Median; blau: E-Wert in % des A-Werts; P-Wert: T-Test (T) bzw. Man-Whitney-Test (U).

Untersuchungszeitraum	n-Zahl	Erhöhtes CO ₂ (E)		Aktuelles CO ₂ (A)	
Vegetationsruhe 98/99 (September 1998 – April 1999)	56	426,5 <i>365,5</i>	130,7 <i>124,4</i>	326,3 <i>293,8</i>	P=0,011 (U)
Vegetationsperiode 1999 (April 1999 – September 1999)	14	1497,5 <i>1482,8</i>	117,9 <i>121,3</i>	1270,2 <i>1222,3</i>	P=0,067 (T)
Vegetationsruhe 99/00 (September 1999 – April 2000)	45	453,6 <i>347,6</i>	116,1 <i>119,8</i>	390,8 <i>290,3</i>	P=0,129 (U)
Vegetationsperiode 2000 (April 2000 – September 2000)	20	1476,5 <i>1432,4</i>	106,7 <i>113,6</i>	1383,7 <i>1261,4</i>	P=0,239 (U)
Vegetationsruhe 2000 (September – Dezember 2000))	31	660,8 <i>562,4</i>	115,2 <i>102,8</i>	573,5 <i>547,1</i>	P=0,248 (U)
Gesamter Meßzeitraum (September 1998 – Dezember 2000)	170	694,4 <i>524,2</i>	117,0 <i>129,3</i>	593,7 <i>405,5</i>	P=0,020 (U)

Tabelle 3.5-B: Bestandesatmung der einzelnen CO₂-Ringe im gesamten Meßzeitraum sowie jährlich. (Messungen erst ab September 1998; daher 1998 nicht mit 1999 und 2000 vergleichbar!)

Aufgrund der geringen Datendichte in der sommerlichen Vegetationsperiode sind die Mittel- und Medianwerte nur als Vergleichsgrößen untereinander gedacht.

Fett: Mittelwert; *Kursiv:* Median; blau: E-Mittel in % des A-Mittels; P-Wert: Ergebnis des T-Tests (T) oder Man-Whitney-Tests (U) der beiden Ringe in der betreffenden Zeitperiode (rot=signifikant).

Periode (n)	E1		A1		E2		A2		E3		A3		E (Mw)		A (Mw)	
Gesamt (170)	724 <i>579</i>	557 <i>411</i>	686 <i>529</i>	603 <i>395</i>	676 <i>515</i>	622 <i>474</i>	694 <i>524</i>	594 <i>406</i>	130 <i>P<0,001</i> (U)	114 <i>P=0,017</i> (U)	109 <i>P=0,499</i> (U)	117 <i>P=0,020</i> (U)				
1998 (28)	527 <i>407</i>	363 <i>324</i>	490 <i>353</i>	338 <i>269</i>	430 <i>388</i>	362 <i>317</i>	482 <i>455</i>	354 <i>327</i>	145 <i>P=0,029</i> (U)	145 <i>P=0,065</i> (U)	119 <i>P=0,241</i> (T)	136 <i>P=0,049</i> (T)				
1999 (62)	670 <i>457</i>	520 <i>343</i>	669 <i>515</i>	551 <i>327</i>	664 <i>428</i>	582 <i>427</i>	668 <i>456</i>	551 <i>358</i>	129 <i>P=0,028</i> (U)	122 <i>P=0,040</i> (U)	114 <i>P=0,640</i> (U)	121 <i>P=0,097</i> (U)				
2000 (80)	835 <i>685</i>	653 <i>505</i>	767 <i>630</i>	736 <i>585</i>	770 <i>585</i>	743 <i>592</i>	789 <i>645</i>	711 <i>572</i>	128 <i>P=0,008</i> (U)	104 <i>P=0,479</i> (U)	104 <i>P=0,860</i> (U)	111 <i>P=0,268</i> (U)				

Der nachlassende Unterschied in der Bestandesatmung wird auch von Tab. 3.5-B belegt: In allen drei Ringpaaren sank der prozentuale Unterschied zwischen dem E- und A-Ring und die P-Werte des T- oder U-Tests steigen an (Ausnahme Ringpaar 1). Über die drei Jahre zeigte Ring E1 im Mittel stets die höchsten Atmungsraten, gefolgt von E2 (1998 und 1999) bzw. E3 (2000). E2 und E3 sowie A2 und A3 waren trotz unterschiedlicher Bodenfeuchte relativ ähnlich in ihren Atmungsraten.

3.5.3 Abhängigkeit der Bestandesatmung von Bodentemperatur und Bodenfeuchte

Wie schon HEINZ (2000) für den Zeitraum November 1999 bis Mai 2000 zeigen konnte, bestand für den gesamten Meßzeitraum eine hohe Korrelation der Bestandesatmung mit der Bodentemperatur in 5 cm Tiefe (Abb. 3.5-D, a und b).

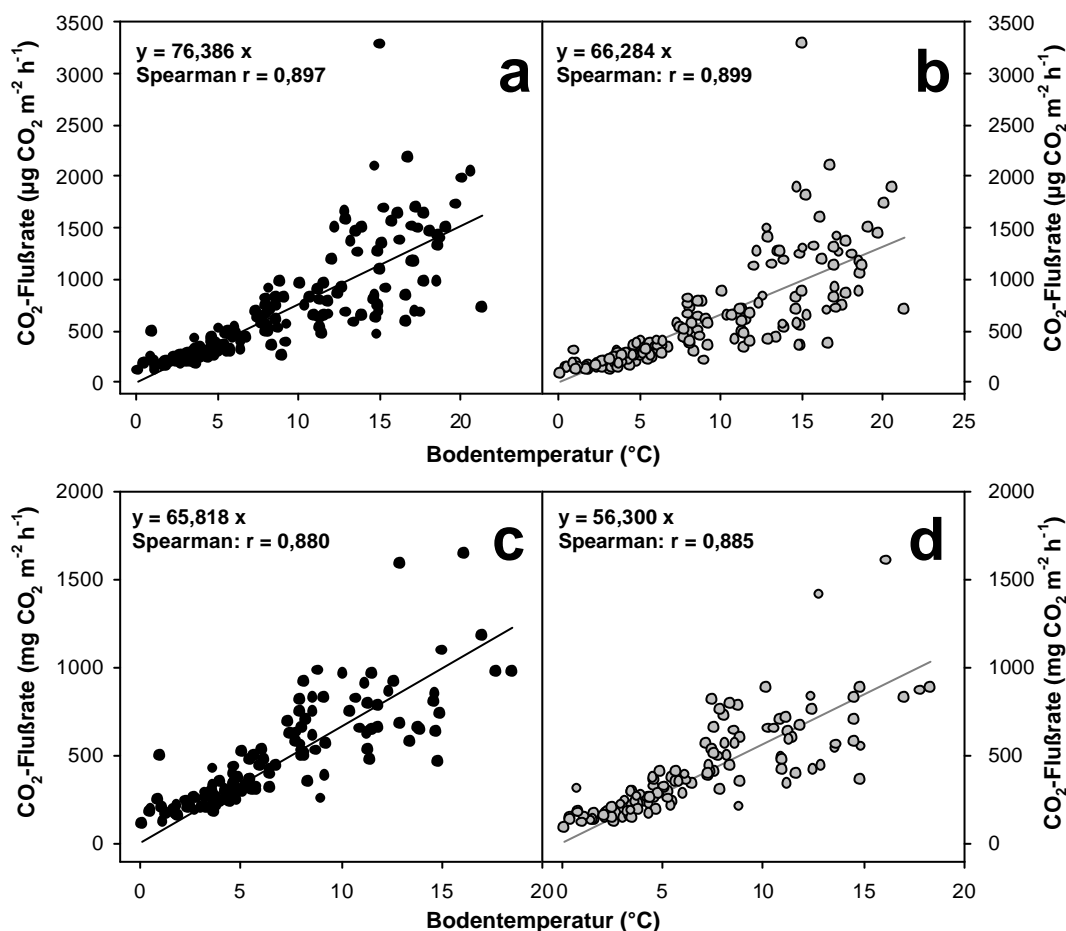


Abbildung 3.5-D: Korrelation der Bestandesatmungsraten (schwarze Punkte: E-Mittel, graue Punkte: A-Mittel) mit der mittleren E- bzw. A-Bodentemperatur in 5 cm Tiefe.

a, b) Raten der gesamten Untersuchungsperiode, einschließlich des hohen "Ausreißer"-Werts am 5. Mai 2000. (n = 156; da einige Temperaturwerte fehlten ist die n-Anzahl geringer als in Tab. 3.5-A)

c, d) Raten der *off-season*-Perioden, jeweils nach der zweiten Ernte bis zur Düngung im April.

In jeder Graphik: Gleichung der durch den Ursprung gelegten linearen Regression zum Vergleich der Steigungen, sowie r-Wert des Spearman-Tests (Bestandesatmungsraten nicht normalverteilt).

Die in E- und A nahezu gleich hohen Korrelation ($r = 0,9$) verbesserte sich nicht dadurch, daß die Werte der sommerlichen Vegetationsperiode (große oberirdische Biomasse) ausgeschlossen wurden (Abb. 3.5-D, c und d). Um die Steigungen der Punktwolken miteinander vergleichen zu können, wurden Regressionsgeraden durch den Ursprung jeder Graphik gelegt (die nicht der tatsächlichen Beziehung von Bodentemperatur und CO_2 -Flüssen entsprechen): Wie Abb. 3.5-D und -E zeigen, war die Steigung der Atmungsraten unter erhöhtem CO_2 größer in jedem E-Ring größer als im zugehörigen A-Ring-Partner.

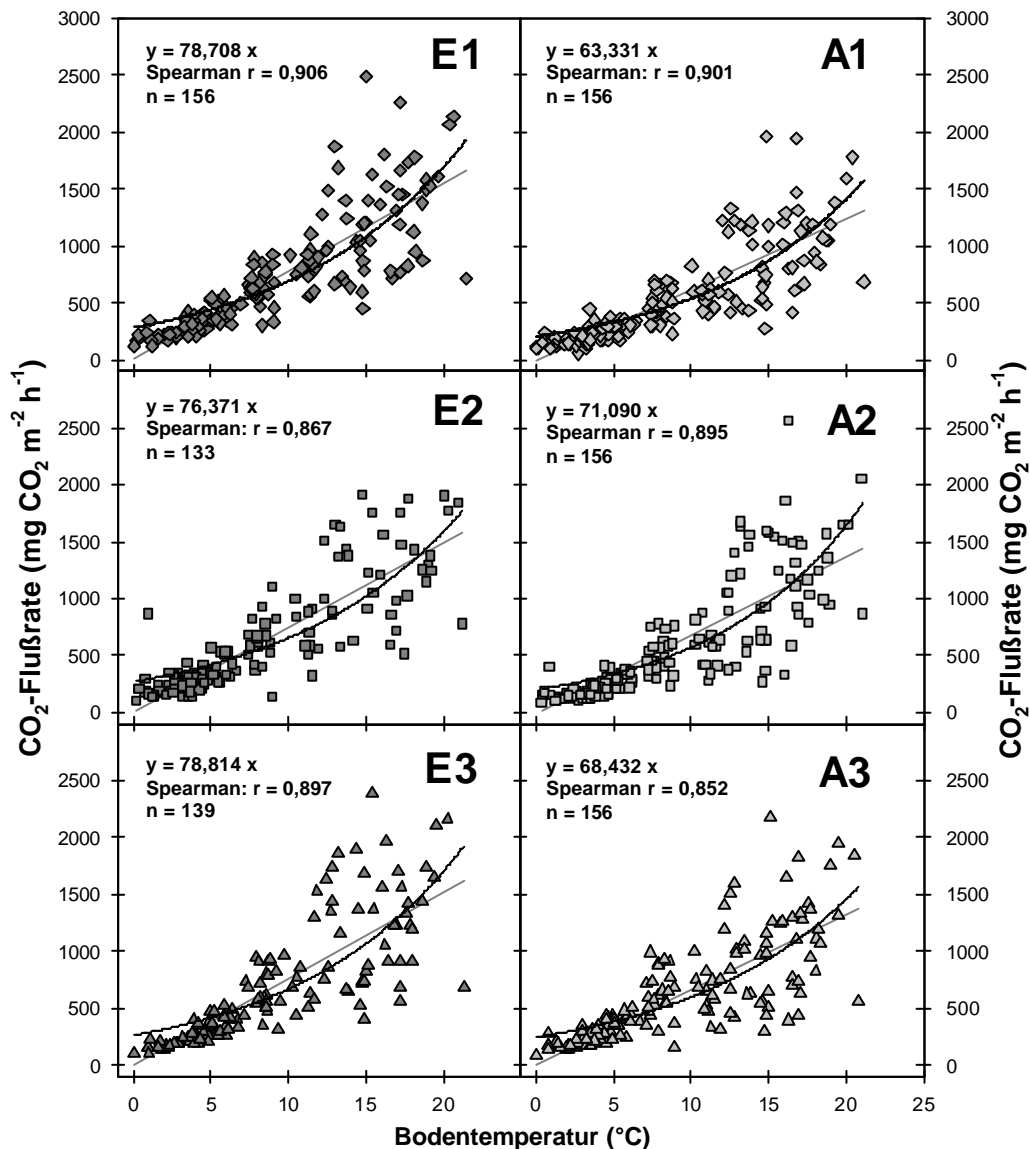


Abbildung 3.5-E: Korrelation der Bestandesatmungsraten der gesamten Untersuchungsperiode mit der betreffenden E bzw. A-Bodentemperatur in 5cm Tiefe (verschiedene n-Zahlen durch Ausfälle der Temperatur-Meßfühler bedingt.) Die nichterkklärbar hohen Atmungsraten des 5. Mai 2000 wurden stets ausgeschlossen.

In jeder Graphik: Graue, gerade Linie: lineare Regression durch den Ursprung (Gradengleichung und r-Wert des Spearman-Tests in der linken Ecke)
schwarze gekrümmte Linie: über Modell a (HEINZ 2000) dargestellte Beziehung der Atmungsraten zur Bodentemperatur, vgl. Text weiter unten.

Der steilere Anstieg der Bestandesatmung mit steigender Temperatur unter erhöhtem CO_2 zeigt die Notwendigkeit, die Temperaturabhängigkeit der beiden CO_2 -Behandlungen mit einem besser angepassten Modell als einer linearen Regression zu vergleichen. So kann festgestellt werden, ob die Atmungsraten unter erhöhtem CO_2 lediglich generell höher sind, oder ob der Anstieg der Atmung mit der Temperatur tatsächlich steiler wird. Hierzu wurde Modell a aus der Diplomarbeit von S. HEINZ übernommen und auf die vorhandenen Datensätze angewendet (Abb. 3.5-E und -F).

In Abb. 3.5-F sind die Bestandesatmungsdaten detaillierter für die einzelnen Jahreszeiträume dargestellt (Modell-Gleichung a: Tab. 3.5-C). Die Aufteilung der Datensätze nach Zeitperioden zeigt, warum die Steigung des Modells a bei den Daten von HEINZ steiler ist als bei den hier dargestellten Datensätzen, die mehrfach das gesamte Jahr umfassen: Die verhältnismäßig niedrigen Atmungsdaten nach der zweiten Ernte bei relativ hohen Bodentemperaturen (dunkelgraue Punkte), sowie die eher niedrigen Raten kurz vor der zweiten Ernte bei geringer Bodenfeuchte (die untersten der weißen Punkte in Abb. 3.5-F) lassen die Kurven weniger stark gekrümmt verlaufen (vgl. Tab. 3.5-C).

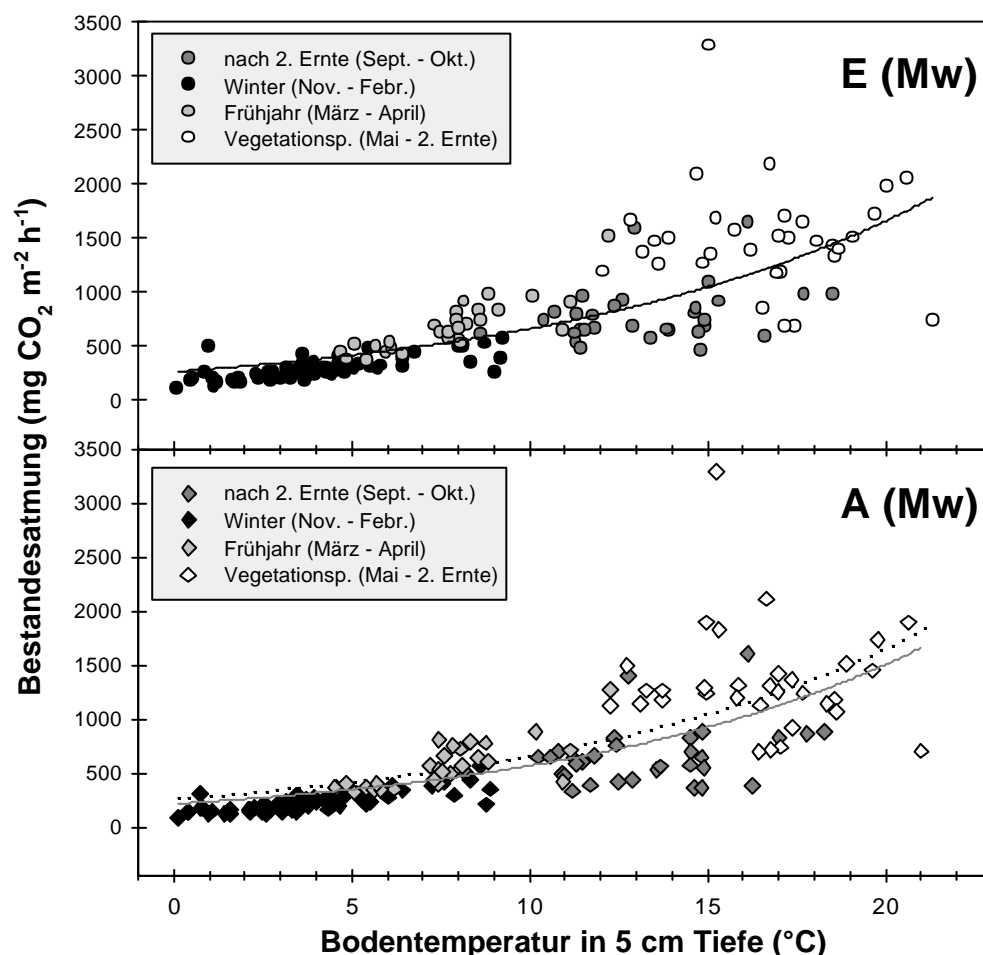


Abbildung 3.5-F: Bestandesatmungsdaten (alle Daten) während verschiedener Zeitperioden (Legende).

Beide Graphiken: Nichtlineare Regressionslinien (durchgezogene Linien): Modell a (Heinz 2000); Ausschluß der Extremwerte vom 5. Mai 2000 aus dem E bzw. A-Datensatz; Gepunktete Linie in der unteren Abbildung: Modellverlauf der E-Raten aus der oberen Abbildung, zur besseren Vergleichbarkeit in A gezeigt. Vergleiche hierzu Tabelle 3.5-C.

Zwischen der Temperaturabhängigkeit der E- und der A-Raten bestand bezüglich ihrer Güte (R^2) nur ein geringer Unterschied (Tab. 3.5-C). Durch Ausschließen der Ausreißerwerte am 5. Mai verbesserte sich die Korrelation deutlich; mit dem Ausreißer läge das R^2 des E-Datensatzes z.B. bei 0,598 statt, wie hier gezeigt, bei 0,659. Der Ausreißerwert ist aber in dem E- und dem A-Datensatz in Abb. 3.5-F dargestellt.

Tabelle 3.5-C: Koeffizienten des Modells a, die durch Anpassung an die gemessenen Werte ermittelt wurden, im Vergleich mit den Werten von Heinz (2000).

Modell a: $\text{Respiration} = a \cdot b^{(T-10)/10}$

Modell a	Heinz (2000)	E-Raten	A-Raten
a	701,0	662,5	568,9
b	4,369	2,506	2,645
R^2	0,871	0,659	0,639

Wie Abb. 3.5-F zeigt, ist die Krümmung der E- und der A-Kurve annähernd gleich, die E-Kurve verläuft jedoch insgesamt auf einem höheren Niveau als die A-Kurve (untere Abbildung in 3.5-F; vgl. a-Werte in Tab. 3.5-C). Der b-Wert ist unter erhöhtem CO_2 etwas niedriger als unter normalem CO_2 ; der Unterschied ist jedoch zu gering, um ihn optisch in Abb. 3.5-F wahrzunehmen. Bei den Ringpaaren 1 und 2 ist die Krümmung der Modellkurve des A-Partners

stärker (A1 und A2), bei Ringpaar 3 ist die des E3 stärker gekrümmt (schwarze Kurven in Abb. 3.5-E). Bei Betrachtung des R^2 des Modells a bei den einzelnen Ringpaaren war jedoch stets das R^2 des ERings besser als das des A-Partners (im Schnitt um 0,05; Koeffizienten aus Abb. 3.5-E nicht tabellarisch dargestellt).

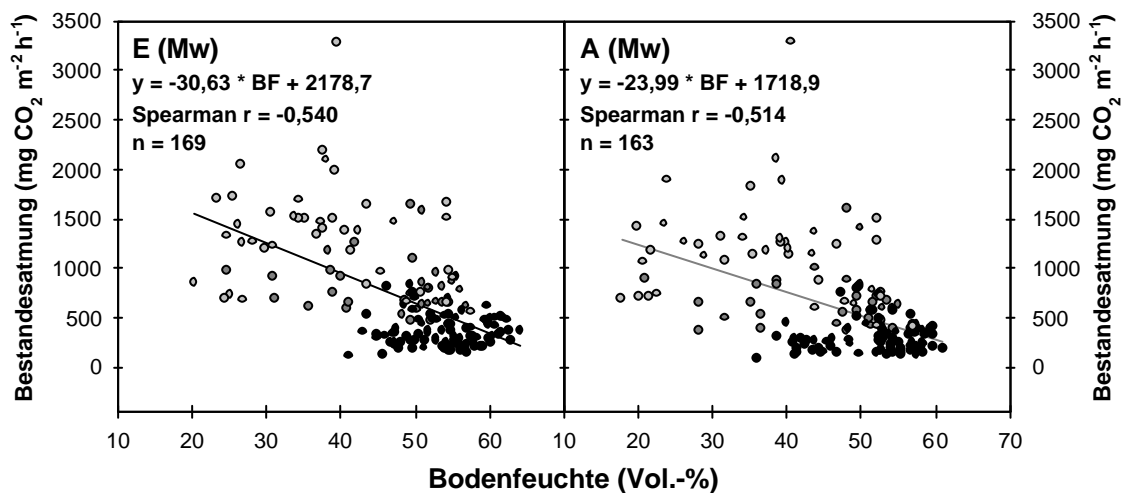


Abbildung 3.5-G: Bestandesatmungsraten des gesamten Untersuchungszeitraums in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte. Schwarze Punkte: Winterperiode (November bis März), dunkelgraue Punkte: Nach der zweiten Ernte bis Ende Oktober, hellgraue Punkte: Vegetationsperiode (April bis zur zweiten Ernte). In jeder Abbildung: Gradengleichung einer linearen Regression durch die gemittelten E- bzw. A-Flußraten, sowie Spearman-Korrelationskoeffizient r und n-Zahl.

Die Korrelation der Bestandesatmung mit der Bodenfeuchte war, unabhängig von der Bodentemperatur betrachtet, wesentlich schlechter als die mit der Temperatur (Abb. 3.5-G). Die r-Werte des Spearman-Tests für die einzelnen Ringe reichten von -0,406 (A2) bis -0,573 (E1) (n-Zahlen von 164 bis 170). Aber auch hier war die